

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Diagnostika vysokonapěťových izolovaných venkovních vedení**  
**Diagnostic of Medium Voltage Covered Conductors**

**2010**

**Bc. Martin Schovajsa**

**PROHLÁŠENÍ:**

*„Místopřísežně prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě dne 7. 5. 2010

.....  
podpis

## **PODĚKOVÁNÍ:**

*Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D. za odbornou pomoc, poskytnuté rady a připomínky při tvorbě diplomové práce.*

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je diagnostika vysokonapěťových izolovaných venkovních vedení. Zjišťování jaký vliv má teplota, vlhkost a různé poruchové stavy na izolaci XPE závěsného izolovaného vodiče.

Teoretická část popisuje metody pro diagnostiku částečných výbojů. Popisuje jak jejich zapojení, tak i schopnost výpovědi. Dále určuje geometrický popis závěsných izolovaných vodičů a rozděluje částečné výboje.

Praktická část popisuje sestavení pracoviště, klimatickou komoru s měřicími přístroji a závěrečné vyhodnocení dlouhodobého měření částečných výbojů závěsného izolovaného vodiče se systémem PAS-W.

## **Klíčová slova**

Diagnostika, částečné výboje, závěsné izolované vodiče, klimatická komora.

## **Abstract**

The aim of this thesis is the diagnosis of isolated high-voltage overhead lines. Surveys what effect the temperature, humidity and various faults of insulation XLPE insulated wires hanging.

The theoretical part describes methods for the diagnosis of partial discharges. Describes how their involvement, and ability statements. It also determines the geometric description of the hanging of insulated wire and divides the partial discharge.

The practical part describes the preparation work, climatic chamber with a measuring device and a final evaluation of long-term measurement of partial discharges hung insulated wire that is running PAS-W.

## **Key words**

Diagnostic, partial discharges, covered-conductor, climatic chamber.

## **Seznam některých použitých symbolů a značek**

<b>veličina</b>	<b>název</b>	<b>jednotka</b>
AD	Převodník analogového signálu na digitální	
ADX-K	Značení vodiče	
AlMgSi	Slitina hliníku, hořčíku a křemíku	
B	Magnetická indukce	(T)
BR	Boční odpor	( $\Omega$ )
C	Kapacita	(F)
C <sub>a</sub>	Testovací objekt	
CC	Spojovací stíněný kabel	
CD	Vazební zařízení	
D	Střední kvadratický součet zdánlivých nábojů	(C <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
DO	Digitální osciloskop	
f	Frekvence	(Hz)
F, M, MT	Značení základních klimatických oblastí	
H	Intenzita magnetického pole	(A.m <sup>-1</sup> )
HV-SAX	Typ izolovaných závěsných vodičů 110 kV	
I	Střední proud částečných výbojů	(A)
i(t)	Kapacitní proud	(A)
j <sub>z</sub>	Činitel zvlnění	(%)
KD	Kapacitní dělič	
KJ	Kulové jiskřiště	
l	Délka vodiče	(m)
L	Počet poruch	(%)
m	Hmotnost	(Kg.km <sup>-1</sup> )
MI	Detektor	
MTN	Měřicí transformátor napětí	
n	Četnost impulsů	(v.s <sup>-1</sup> )
OL	Optický kabel	
OSC	Osciloskop	
P	Výkon částečných výbojů	(W)
PAS-W	Izolační systém	
PO	Přepět'ová ochrana	
q	Zdánlivý náboj	(C)
Q	Součtový náboj	(C)
R	Odpor vodiče	( $\Omega$ )
RMS	Efektivní hodnota	(V)
S <sub>m</sub>	Mechanické namáhání	
t	Životnost izolace	
t <sub>i</sub>	Doba výskytu částečného výboje	(s)
t <sub>k</sub>	Teplota klimatické komory	(°C)

veličina	název	jednotka
$\operatorname{tg} \delta$	Ztrátový činitel	(-)
TR	Transformátor	
$u_{10}$	Napětí v dutince, pokud nedojde k přeskoku	(V)
$u(t)$	Napětí	(V)
$U_e$	Zhášecí napětí částečných výbojů	(V)
$U_z$	Zapalovací napětí	(V)
VPA 135	Typ podpěrného keramického izolátoru	
VSO 25	Typ kapacitního snímače napětí	
VTS 25	Typ měřicího transformátoru napětí	
$\Delta W_{aj}$	Energie měřená na svorkách objektu	(J)
XPE	Síťovaný polyethylen	
$Z_m$	Měřicí impedance	( $\Omega$ )
$\epsilon_r$	Poměrná permitivita	
$\varphi_i$	Fázový úhel	( $^\circ$ )

## OBSAH:

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>METODY PRO DIAGNOSTIKU IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ .....</b>	<b>2</b>
2.1	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA .....	2
2.2	DIAGNOSTICKÉ METODY .....	2
2.2.1	Napětové zkoušky .....	3
2.2.2	Stejnoseměrná měření .....	4
2.2.3	Místková měření.....	4
2.2.4	Pulzní a VF měření.....	4
2.2.5	Mechanické a akustické zkoušky.....	5
2.2.6	Tepelné a chemické testy .....	5
2.2.7	Smyslová kontrola.....	5
2.2.8	Nástroje diagnostiky.....	6
<b>3</b>	<b>GEOMETRICKÝ POPIS IZOLOVANÝCH ZÁVĚSNÝCH VODIČŮ, ZÁKLADNÍ PARAMETRY .....</b>	<b>7</b>
3.1	KONSTRUKCE VODIČŮ.....	7
3.1.1	Vodič SAX-W se systémem PAS-W 20 až 35 kV.....	7
3.1.2	Vodič ADX-K se systémem zesíleného PE 22kV.....	9
3.1.3	Izolovaný vodič SAX pro VVN se systémem PAS 110kV.....	10
3.2	DEGRADAČNÍ ČINITELÉ .....	11
3.2.1	Elektrické namáhání.....	11
3.2.2	Mechanické namáhání.....	12
3.2.3	Tepelné namáhání.....	12
3.2.4	Enviromentální namáhání .....	12
<b>4</b>	<b>ELEKTRICKÉ VÝBOJE .....</b>	<b>14</b>
4.1	ROZDĚLENÍ VÝBOJŮ .....	14
<b>5</b>	<b>ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....</b>	<b>16</b>
5.1	ROZDĚLENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	16
5.1.1	Vnitřní a povrchové částečné výboje .....	16
5.1.2	Vnější částečné výboje .....	22
<b>6</b>	<b>POPIS SYSTÉMU KLIMATICKÉ KOMORY .....</b>	<b>24</b>
6.1	POUŽITÉ KOMPONENTY .....	25
<b>7</b>	<b>METODY DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....</b>	<b>29</b>
7.1	PŘÍMÉ ELEKTRICKÉ METODY DETEKCE .....	29
7.1.1	Globální metoda měření částečných výbojů .....	30
7.1.2	Měřicí impedance snímání částečných výbojů.....	32
7.2	NEPŘÍMÉ ELEKTRICKÉ METODY .....	34
7.2.1	Metoda induktivně vázané sondy.....	34
7.2.2	Metoda diferenciální elektromagnetické sondy .....	35
7.2.3	Kapacitní drážková sonda .....	36
7.2.4	Kapacitní snímače .....	37

7.2.5	LEMKE sonda.....	38
7.2.6	Induktivní snímače.....	38
7.3	NEELEKTRICKÉ METODY DETEKCE.....	39
7.3.1	Akustická detekce.....	40
7.3.2	Optická detekce.....	40
7.3.3	Chemická detekce .....	41
7.3.4	Detekce obsahu plynů.....	41
7.4	ELEKTRICKÁ RUŠENÍ PŘI ON-LINE MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	42
<b>8</b>	<b>VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....</b>	<b>43</b>
8.1	VELIČINY VZTAŽENÉ K JEDNOTLIVÝM IMPULSŮM.....	43
8.2	VELIČINY INTEGROVANÉ .....	43
8.3	NAPĚTÍ VZTAHOVANÁ K ČÁSTEČNÝM VÝBOJŮM .....	44
<b>9</b>	<b>NÁVRH MĚŘENÍ PARAMETRŮ IZOLOVANÉHO VODIČE PRO RŮZNÉ PROVOZNÍ A PORUCHOVÉ STAVY.....</b>	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ STAVU IZOLAČNÍHO SYSTÉMU VN ZÁVĚSNÝCH VODIČŮ V RŮZNÝCH KLIMATICKÝCH PODMÍNKÁCH.....</b>	<b>46</b>
10.1	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ V ZÁVISLOSTI NA VLHKOSTI .....	46
10.2	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SIMULUJÍCÍ PORUCHU PÁDU VODIČE NA UZEMNĚNOU KONZOLI .....	49
10.3	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SIMULUJÍCÍ PORUCHU PÁDU VODIČE NA ZEM, KDE MATERIÁLEM STYKU IZOLOVANÉHO VODIČE SE ZEMÍ JE PÍSEK .....	52
<b>11</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
	<b>LITERATURA: .....</b>	<b>57</b>



# 1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je diagnostika vysokonapěťových izolovaných venkovních vedení.

V teoretické části jsem se zabýval metodami pro diagnostiku částečných výbojů. Popisuje zapojení pracoviště i schopnost výpovědi různých metod. Uvedl jsem geometrický popis závěsných izolovaných vodičů a rozdělil částečné výboje.

Dále podrobně popsal systém klimatické komory a měřicí přístroje. Uvedl veličiny charakterizující částečné výboje.

**Experimentální měření stavu izolačního systému vn závěsných vodičů v různých klimatických podmínkách pro různé provozní a poruchové stavy:**

První úloha popisuje přípravu a průběh měření, kdy bylo závěsné izolované vedení namáháno dlouhodobě a bez poruchy v klimatické komoře při různých stupních vlhkosti. Měření probíhalo jak při teplotě v místnosti, tak u zahřátého a následně i ochlazeného prostředí.

V druhé úloze je popsáno měření simulující poruchu pádu vodiče na uzemněnou konzoli. Pro simulaci této poruchy jsem použil uzemněný plech, na který byl položen závěsný izolovaný vodič. Toto měření probíhalo dlouhodobě taktéž jako u první úlohy při třech odlišných teplotách.

Třetí úloha obsahuje měření simulující poruchu pádu vodiče na zem, kde materiál styku izolovaného vodiče se zemí je písek. Měření probíhala dlouhodobě při pokojové, zvýšené a mrznoucí teplotě.

## 2 Metody pro diagnostiku izolačních systémů

Elektrotechnika se skládá z odvětví průmyslu, kde se stále stupňují požadavky na přesnost, spolehlivost a kvalitu výroby výrobků. Přistupujeme proto prioritně k jakosti při výrobě, kde se stává bezpodmínečnou nutností normy řady ISO 9000 a s ní související ISO 14000 [1].

### 2.1 Technická diagnostika

Ze starší a dlouholeté lékařské diagnostiky se postupně vyvinul nový obor, kde se stupňovali požadavky na provoz a funkčnost zařízení, tak vzniká technická diagnostika. Pro uvedení strojního zařízení na trh se vztahuje nařízení vlády č.378/2001 Sb. [1].

Můžeme stanovit tři základní typy, které určují stav technického objektu:

- a) *Diagnóza* je analýza okamžitého stavu objektu neboli zjišťování technického stavu objektu v přítomnosti.

Diagnóza má za úkol:

- Detekovat poruchy (identifikace částečné nebo úplné poruchy)
- Lokalizovat poruchy (určení místa poruchy)

S detekcí souvisí tzv. diagnostické rozlišení, které udává počet detekovaných poruch daným algoritmem. Diagnostické rozlišení je většinou vyjádřeno relativní hodnotou  $L_{rel}$ , kterou určuje poměr detekovaných poruch  $L$  k celkovému počtu možných, na objektu definovaných poruch  $L_{max}$ .

$$L_{rel} = \frac{L}{L_{max}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1.1)$$

- b) *Prognóza* odhaduje (na základě vyhodnocení měření) technický stav objektu do budoucna.
- c) *Geneze* zkoumá stav a určuje příčiny poruchy, které měl objekt v blíže určené minulosti [3].

### 2.2 Diagnostické metody

Nemalá důležitost u strojů je přikládána jak bezporuchovosti tak schopnost předejít havárii nebo nucené odstávce stroje. Což může způsobit nemalé energetické i finanční ztráty. Proto je snaha jak výrobců, tak i uživatelů zajistit co nejvyšší spolehlivost a bezpečnost strojů zvolením co nejpresnější a nejvhodnější diagnostické metody. Spolehlivost zařízení je omezena spolehlivostí nejslabšího článku, kterou můžeme posuzovat na základě diagnostického měření.

Diagnostika je považována za proces zkoumající podmínky a vlastnosti zařízení v provozu, aby se odhalili defekty, dysfunkce a anomálie, které mohou vést k poruše a přerušení provozu.

Existuje množství diagnostických metod, které slouží k zjišťování aktuálního stavu izolačního systému. Žádná neumí řešit tuto problematiku komplexně, samostatně a jednoznačně. V průběhu let si diagnostická pracoviště vytvořili vlastní soubor diagnostických metod navzájem doplňujících. Výběr metod ovlivňuje schopnost výpovědi dané metody, která

je ovlivněna společně s požadavky na přerušení provozu, stupně ohrožení izolace při měření a požadavky na vybavení pracoviště [5].

Diagnostické metody řadíme podle charakteristických vlastností do sedmi základních skupin:

- Zkoušky zvýšeným napětím
- Stejnosměrná měření
- Střídavá můstková měření
- Pulzní a vysokofrekvenční měření
- Mechanická a akustická měření
- Tepelná a chemická měření
- Smyslová kontrola [4].

### 2.2.1 Napět'ové zkoušky

Napět'ové zkoušky mnohdy také nazývané zkoušky zvýšeným napětím. Tyto zkoušky jsou jedny z důležitých při testování elektroizolačních materiálů a elektrických zařízení. Podávají informaci o elektrické pevnosti zkoumaného objektu. Sledujeme elektrickou pevnost, protože její hodnota je rozhodující pro návrh a konstrukci izolačního systému všech elektrických strojů.

Elektrický průraz nastane při porušení izolace zařízení, kdy výboj naruší izolační systém nebo přemostí zkoušenou izolaci (vnitřně, po povrchu) a napětí mezi elektrodami se sníží až k nule. K elektrickému průrazu dochází ve všech skupenstvích (pevné, kapalné, plynné) i kombinovaném dielektriku. Dochází-li průraznému výboji v kapalinách nebo v plynech hovoříme o přeskoku. U pevných dielektrik se používá termín průraz. Podle druhu přiloženého napětí se rozlišují zkoušky stejnosměrným napětím, zkoušky střídavým napětím a zkoušky impulsním napětím. Tyto definice a postupy jsou uvedeny v normě ČSN IEC 60-1 [5].

tab.2-1 Napět'ové zkoušky [4].

Napět'ové zkoušky		Ohrožení vinutí	Schopnost výpovědi
Výdržná zkouška	50Hz	3	3
	ss napětím	3	4
	0,1 Hz	3	2-3
	půlvlna napětí	2	2-3
	impuls y	2	2
Průrazná zkouška (částečné výboje)		5	2

K dané tabulce si stanovíme legendu. Ohrožení vinutí může obsahovat hodnocení od 1 do 5. Kde číslo 1 značí velmi malé, nebo nepatrné ohrožení vinutí. Číslo 5 určuje velké ohrožení vinutí, nebo až zničení vinutí průrazem. Schopnost výpovědi je značená taktéž v rozsahu od 1 do 5. Schopnost výpovědi s číslem 1 je velmi dobrá. Zatímco s číslem 5 je schopnost výpovědi špatná až nedostatečná.

### 2.2.2 Stejnosměrná měření

Stejnosměrné zkušební napětí přivedené na zkoušené zařízení by nemělo mít činitel zvlnění větší jak 3%. Činitel zvlnění je periodická odchylka od aritmetické střední hodnoty napětí.

$$j_z = \frac{U_{\max}}{U_{ss}} \cdot 100(\%) \quad (1.2)$$

Přiložené napětí se plynule zvyšuje od nízké napěťové hladiny, aby se zabránilo účinku přepětí v důsledku spínacího přechodového děje [5].

tab.2-2 Stejnosměrná měření [4].

Stejnosměrná měření	Ohrožení vinutí	Schopnost výpovědi
Izolační odpor	1	4
Polarizační index	1	4
Polarizace/depolarizace =f(t)	1	2-4
Polarizace v 100% rel. vlhkost	1	1-3

### 2.2.3 Můstková měření

Pro zlepšení principu měřicí metody musíme lépe určit prvky náhradního schématu dielektrika. Měříme závislosti  $\tan \delta$  a  $\epsilon_r$  na napětí, teplotě a frekvenci.

Rozhodující je frekvenční závislost těchto parametrů. Pro danou frekvenci musíme zvolit náležitou metodu. Potřebné náležitosti jsou zahrnuty v normě ČSN IEC 250, která se zabývá doporučenými postupy ke stanovení permitivity ztrátového činitele u elektroizolačních materiálů.

Provádíme-li praktická měření v oblasti průmyslové a jí blízkých frekvencí používáme metody můstkové. U vyšších kmitočtů (desítky kHz) používáme metodu rezonanční [6].

tab.2-3 Můstková měření [4].

Můstková měření	Ohrožení vinutí	Schopnost výpovědi
Změna $\tan \delta$ , změna C	2	3
Analyzátor dielektrických ztrát	2	2-3
RC (izolační časová konstanta)	2	2-3

### 2.2.4 Pulzní a VF měření

Nejpoužívanější pulzní metodou je globální metoda měření částečných výbojů. Založená na sledování částečných výbojů pomocí měřicí impedance. Impedance je většinou realizována RCL členem společně s ochrannými prvky proti přepětí. Slouží také k odfiltrování superponovaných pulzů částečných výbojů od napájecí frekvence.

Přímé měření částečných výbojů specifikuje norma ČSN EN 60270 [5].

tab.2-4 Pulzní a VF měření [4].

Pulzní a VF měření	Ohrožení vinutí	Schopnost výpovědi
Detektor částečných výbojů	2	2
Analýza signálů v nulovém vodiči	2	1-3
Drážková sonda manuální	2	2
Drážková sonda automatická	1	2
Impulsní analýza částečných výbojů	1	1

### 2.2.5 Mechanické a akustické zkoušky

Zkoušky ultrazvukem jsou založeny na změnách propustnosti a odrazivosti ultrazvukové vlny vzniklé necelistvostí materiálu. Ultrazvuk se podobně jako zvuk šíří v pružném prostředí ve frekvenčním rozsahu nad 20 kHz. Pro ultrazvukové zkoušky se běžně pracuje ve frekvenčním rozsahu od 100kHz do 50 MHz (vyjíměčně do 200 MHz). Pro ultrazvukem testované materiály je důležitý akustický tlak. Ten je úměrný elektrickému napětí na polepech ultrazvukové piezoelektrické sondy [6].

tab. 2-5. Mechanické a akustické zkoušky [4].

Mechanické a akustické zkoušky	Ohrožení vinutí	Schopnost výpovědi
Rázové impulsy (ložiska)	1	1
Ultrazvuk (lokalizace částečných výbojů)	2	2-3
Akustické emise	(2)	(2)

### 2.2.6 Tepelné a chemické testy

Částečné výboje mohou probíhat i u přístrojů izolovaných a chlazených olejem nebo plynem. Činnost výbojů lze detekovat v určitých případech pomocí analýzy produktů rozkladu rozpuštěných v oleji nebo v plynu. Během dlouhodobého provozu se hromadí nežádoucí produkt, který se podrobí chemické analýze. Ta může sloužit i pro další odhad degradace, která je způsobena činností částečných výbojů [4].

tab. 2-6. Tepelné a chemické testy [4].

Tepelné a chemické testy	Ohrožení vinutí	Schopnost výpovědi
Teplota	1	1-4
Plyny z přehřáté izolace	1	2
Plyny návěstidel	1	1

### 2.2.7 Smyslová kontrola

Neméně podstatnou diagnostickou metodou je smyslová kontrola. Především vizuální kontroly, ale i jiné smyslové kontroly. Metody smyslové kontroly jsou velmi subjektivní a velmi záleží na zkušenostech hodnotících pracovníků. [4].

tab. 2-7. Smyslová kontrola [4].

<b>Smyslová kontrola</b>
Test částečných výbojů ve tmě
Ochrana proti koróně: drážky, čela
Stav izolace: drážky, čela
Klínování, upevňování, spoje
Statorové plechy

### 2.2.8 Nástroje diagnostiky

Diagnostika je sledování stavu s určitou přesností a věrohodností. Pro sledování stavů potřebujeme prostředky nutné k vykonávání diagnostických činností. Shromáždění činností v celek tvoří diagnostický systém, splňující podmínky a s nimi propojené požadavky:

- *Instrumentální vybavení pro diagnostiku*, soubor měřidel s vhodnými převodníky a potřebnými čidly
- *Model diagnostikovaného objektu* je vhodný jak pro simulace bezchybných provozních stavů, tak i všechny poruchové stavy diagnostikovaného objektu (všechny možnosti, které se při dané diagnostice mohou vyskytnout)
- Volba vhodného přístupu k řešení diagnostického problému  
Fenomenologický – diagnostikovaný objekt reaguje na vstupní diagnostické signály  
Strukturální – prioritní je, co se děje u diagnostikovaného objektu v systému, struktuře
- Destruktivnost, nedestruktivnost zkoušek  
Destruktivní zkoušky- velká schopnost výpovědi a velká spotřeba experimentálního materiálu (znehodnocen zkouškami), ekonomicky náročnější  
Nedestruktivní zkoušky – experimentální materiál zůstává nepoškozen, mnohačetné opakování zkoušek
- Volba postupu diagnózy (off-line, on-line)
- Znalostní a zkušenostní potenciál, pracovníci s odpovídajícími zkušenostmi a znalostmi na požadované úrovni (vhodný § vyhlášky 50/78Sb.)
- Stanovení metodologie, postup, neboli vlastní diagnostika. Určení jednotlivých diagnostických operací, jejich optimalizace a návaznost.
- Dále stanovení jednotlivých kroků diagnózy s respektováním ekonomických aspektů [1].

### **3 Geometrický popis izolovaných závěsných vodičů, základní parametry**

V následující kapitole jsou popsány druhy venkovních izolovaných závěsných vodičů. Nejvíce je u izolovaných závěsných vodičů namáhán izolační systém, který patří k nejdůležitějším komponentům VN soustavy.

#### **3.1 Konstrukce vodičů**

Použitý materiál je základním elementem při výrobě elektrických zařízení. Ten dále rozlišujeme podle úpravy látky. Látku můžeme rozdělit na několik menších systémů a prvků. Těmi jsou myšleny současné době nedělitelné částice [7].

Konstrukce izolovaných vodičů závisí na provozním napětí, počtu žil, použité izolaci, provozních podmínkách a vlivu prostředí.

Izolovaný vodič můžeme zjednodušeně rozdělit na tři hlavní části:

- Jádru
- Izolace
- Ochranný obal

##### **3.1.1 Vodič SAX-W se systémem PAS-W 20 až 35 kV**

Vodič SAX-W, mnohdy označovaný též PAS-W se používá pro distribuci elektrické energie jako závěsný izolovaný vodič. Používaný především ve Finsku. Vodič byl konstruován, aby odolával náročným klimatickým podmínkám. Vodič je velmi namáhavý. Působí na něj agresivní prostředí společně s uv zářením.

Ve Finsku je vodič oblíbený pro distribuci v zalesněných oblastech. V případě nepříznivého počasí může dojít k situaci, kdy bude vodič zatěžován padajícím stromem. Pak může dojít vlivem částečných výbojů k průrazu na zem.

##### **Přednosti systému PAS:**

- Při vzájemném dotyku vodičů nedochází ke zkratu
- Izolace vodičů do určité míry omezuje jejich korozi způsobenou agresivním venkovním prostředím
- Zmenšením fázové vzdálenosti vodičů je možná výstavba výcenásobných vedení na společných podpěrách. Nedochází však k rozšíření konfigurace vodičů na hlavě stožáru.
- Snížení rizika poruchovosti vzniklého pádem stromů do vedení, nebo dotykem mokřých větví
- Stromy, které při pádu namáhají vodič mohou být odstraněny později
- Zmenšení průchozí oblasti působí ekologicky v lesních porostech.
- Vedení neohrožuje přisedající ptactvo. Izolované vedení lze doplnit izolačními kryty izolátorů a kryty svorek [8].



Obr. 3-1 Foto izolovaného vodiče SAX-W se systémem PAS-W 20 až 35 kV

**Konstrukce kabelu SAX-W se systémem PAS-W pro 20 až 35 kV:**

1. jádro slané z drátů slitiny hliníku AlMgSi, odolné vodě,
2. izolaci tvoří XLPE typu DIX3, odolná proti povětrnostním vlivům a UV záření [9].

tab. 3-1 Konstrukční, mechanické a elektrické vlastnosti izolovaného vodiče SAX

se systémem PAS pro 20 až 35 kV [9].

Konstrukční hodnoty	SAX(PAS) 50	SAX(PAS) 70	SAX(PAS) 95	SAX(PAS) 120	SAX(PAS) 150
Jmenovitý průměr jádra vodiče (mm)	8	9,7	11,3	12,8	14,2
průměr vodiče s izolací (mm)	13,0	14,7	16,3	17,8	19,2
Celková váha (kg. km <sup>-1</sup> )	200	270	350	425	495
<b>Elektrické vlastnosti</b>					
Odpor vodiče při teplotě 20°C (Ω.km <sup>-1</sup> )	0,720	0,493	0,363	0,288	0,236
Max. přípustný tepelný zkratový proud 1s (kA)	4,3	6,4	8,6	11,0	13,5
Nosná proudová kapacita vodiče +80°C (A)	245	310	370	430	485

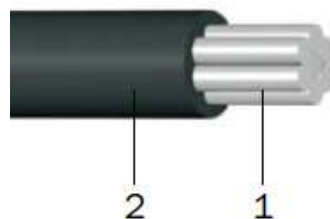


**Mechanické  
vlastnosti**

Minimální mezní zatížení (kN)	15,0	20,6	27,9	36,0	43,4
Modul pružnosti (N. mm <sup>-2</sup> )	57000	57000	57000	57000	57000
Koeficient teplotní délkové roztažnosti (1. °C <sup>-1</sup> )	23.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>

**3.1.2 Vodič ADX-K se systémem zesítěného PE 22kV**

Vodiče jsou určeny pro venkovní rozvod elektrické energie v závěsném provedení. Tento typ vodiče vyrábí firma PRAKAB, PROSPER a jiné.



*Obr. 3-2 Izolovaný vodič ADX-K se systémem zesítěného PE 22kV*

**Popis vodiče ADX-K se systémem PE 22kV:**

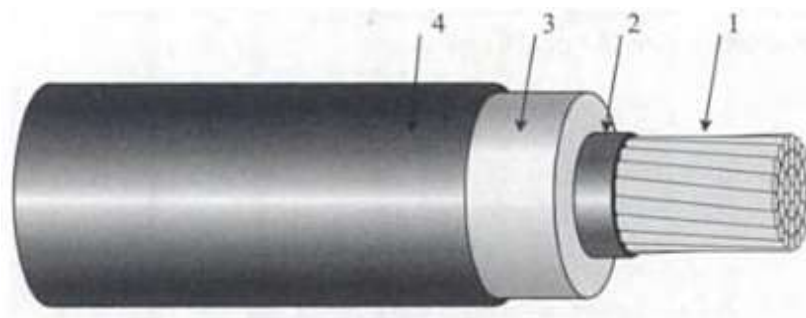
1. Jádru je tvořené slitinou AlMgSi
2. Izolaci tvoří zesítěný PE materiál

*tab. 3-2. Konstrukční, mechanické a elektrické vlastnosti izolovaného vodiče ADX-K se systémem zesítěného PE od 22kV do 35kV [9].*

Vlastnosti	25 ADX-K 35	25 ADX-K 50	25 ADX-K 70	25 ADX-K 120
Průměr vodiče (mm)	12,2	13,4	15,1	18,3
Hmotnost izolovaného vodiče (kg. km <sup>-1</sup> )	142	192	249	412
Maximální odpor jádra (Ω. km <sup>-1</sup> )	0,967	0,690	0,507	0,285
Zaručená pevnost jádra (kN)	9,5	13,5	19,0	33,5
Proudová zatížitelnost na vzduchu (A)	200	245	310	430

### 3.1.3 Izolovaný vodič SAX pro VVN se systémem PAS 110kV

Izolovaný vodič SAX pro VVN se zesíťenou izolací PAS je první distribuční vodič (daného druhu) na světě s nízkým elektromagnetickým polem určený pro přenosové vedení VVN.



Obr. 3-3 Izolovaný závěsný vodič SAX pro VVN se systémem PAS 110kV

#### Konstrukce kabelu SAX se systémem PAS 110kV:

1. slané jádro zhotovené z utužené slitiny, odolné vodě, dostupné od 120 až do 355 mm<sup>2</sup>
2. vylišovaná dělicí XLPE clona
3. vylišovaná vodě odolná izolace XLPE samostatná izolační směs tloušťky 2,5 až 5,5 mm
4. vylišovaná vrstva XLPE tvořená z izolační směsí, odolné vlivu nepříznivého počasí, tloušťka 1mm

tab. 3-3. Konstrukční, mechanické a elektrické vlastnosti izolovaného vodiče SA pro VVN se systémem PAS pro 110kV [9].

Konstrukční hodnoty	HVSAX 120	HVSAX 150	HVSAX 185	HVSAX 240	HVSAX 355
Jmenovitý průměr jádra vodiče (mm)	12,8	14,2	15,8	18,1	22,5
průměr vodiče (mm)	27,0	28,5	30,3	32,7	37,5
Celková váha (kg. km <sup>-1</sup> )	740	850	990	1200	1650
Elektrické vlastnosti					
Odpor vodiče při teplotě 20°C (Ω.km <sup>-1</sup> )	0,268	0,236	0,186	0,145	0,0949
Max. přípustný tepelný zkratový proud 1s (kA)	11,0	13,5	17,0	22,3	33,8

Nosná proudová kapacita vodiče +80°C (A)	400	455	520	610	795
<b>Mechanické vlastnosti</b>					
Minimální mezní zatížení (kN)	11,2	15,5	22,5	30,4	38,0
Modul pružnosti (N. mm <sup>-1</sup> )	61000*	61000*	61000*	61000*	61000*
Koeficient teplotní délkové roztažnosti (1.°C <sup>-1</sup> )	23.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>	23.10 <sup>-6</sup>

*\* Minimální mezní zatížení je při počátečním modulu pružnosti.*

#### **Výhody použití vodiče SAX pro VVN se systémem PAS 110kV:**

- Vodiče zabírají méně prostoru, jsou skladné
- Jejich nezifázová vzdálenost je snížena až na jednu třetinu při porovnání s běžnými holými vodiči VVN 110kV.
- Pro zmenšení jejich mezifázové vzdálenosti umožňuje projektovat nové, modernější stožáry. Vedení lze aplikovat i na dřevěné sloupy.
- Systém PAS 110kV je díky unikátnímu systému izolovaných vodičů a danému vyvinutému příslušenství určenému převážně tomuto systému považován za bezúdržbové vedení [8].

### **3.2 Degradací činitelé**

Ač si to nějak výrazně neuvědomuje, nebo nechceme připustit, že degradační činitelé budou neustále stupňovitě s časem působit na vodič a hlavně na izolant.

Degradací činitele můžeme rozdělit do několika základních skupin:

- Elektrické
- Mechanické
- Tepelné
- Klimatické podnebí (enviromentální)

#### **3.2.1 Elektrické namáhání**

Elektrické namáhání je způsobeno napětím, proudem a jím způsobeným magnetickým polem. Elektrické stárnutí se způsobí dielektrickými ztrátami v izolantu. Při vyšším napětí dochází k růstu počtu volných nosičů náboje a jejich pohyblivosti v izolantu. Materiál ztrácí své izolační schopnosti. Přílišné zvýšení elektrické vodivosti vede k průrazu izolantu. Velikost průrazného napětí závisí na intenzitě elektrického pole [10].

Při napět'ovém namáhání můžeme stanovit životnost:

$$t = k \cdot U^{-n} \quad (3.1.)$$

U velikost napětí

k, n materiálové konstanty

### 3.2.2 Mechanické namáhání

Dalším degradačním činitelem je mechanické a termomechanické namáhání. Mechanickému namáhání jsou vystaveny např. kabely již při výrobě, při dopravě a při manipulacích s nimi a také při provozu. Při technologickém procesu působí shluk vibrací a mechanických rázů poháněného zařízení nebo vhodného mechanického spojení elektromotoru s poháněným zařízením. Záleží na amplitudě a frekvenci mechanických kmitů. Přípustná hodnota vibrací je stanovena normami. Vibrace mají degradační účinek na mechanické části stroje, především ložiska a hřídel, ale také na vinutí a jeho izolační systém. Při ruční výrobě vinutí je mechanické namáhání dáno u většiny případů nedodržením technologických postupů při navíjení cívek a při jejich vkládání do drážek. Při strojním vkládání dochází vlivem protažení jádra drátu k snížení průrazného napětí lakovaných drátů oděrem laku. U točivých strojů může mechanické namáhání určit z vlivu amplitudy a frekvence mechanického kmitání [10].

Životnost izolace pak můžeme určit vztahem:

$$T = K_m \cdot S_m \quad (2.2.)$$

K, m jsou konstanty

S<sub>m</sub> mechanické namáhání.

### 3.2.3 Tepelné namáhání

Pro výrobu elektrických strojů a přístrojů a jiných zařízení se používají především kovy a izolační materiály. Za normálního provozu je tepelné namáhání vodičů běžné, zatímco podstatné je tepelné namáhání, které je třeba eliminovat, či omezit, je u izolantů. Izolant musí mít dobré dielektrické vlastnosti společně s dobrou tepelnou odolností. Požadavků na izolační systémy je kolem 5 desítek. Ztráty ve strojích se přeměňují v teplo, kterému jsou izolační materiály vystaveny. Malá odolnost oproti teplotám izolačních materiálů proti kovům, značně omezuje využití strojů. Dobrá znalost vlastností izolačních materiálů je důležitá při projekci a návrhu stroje [10].

Tepelné namáhání dělíme podle charakteru na krátkodobé a dlouhodobé, které může působit i nenávratné změny struktury materiálů.

### 3.2.4 Enviromentální namáhání

Elektrická zařízení potřebují pro provoz vhodné klimatické podnebí. Proto volíme takové výrobní materiály, aby dobře odolávaly klimatu pro dané oblasti a způsobu umístění po celou dobu provozu.

Druh konstrukce, technologii výroby a používání zařízení musí být provedeno pro předpokládané umístění, klimatickou oblast, působení vlivu koroze a jiné speciální provozní

podmínky. Základní rozdělení do klimatických oblastí je uvedeno v tab. 2-3. Rozdělení klimatických oblastí a požadavků je podle ČSN 332350 [11].

*tab. 3-4. Rozdělení do základních klimatických oblastí [12]*

<b>Typ klimatu</b>	<b>Označení</b>	<b>Musí odolávat</b>
Mírné klima	N	Základní (podle ČSN 33 2000-5-51)
Chladné klima	F	Vlhku, dešti, mrazu, ledu (nejnižší teplotě)
Vlhké klima	TH	Vysoké teplotě (nejvyšší teplotě a vlhkosti, ve které mají pracovat), orosení, silným deštěm, biologickým činitelům, působení přímého slunečního záření
Suché tropické klima	TA	Vysoké teplotě(nejvyšší teplotě ve které mají pracovat), intenzivní sluneční záření, rozdílu teplot vzduchu v průběhu 24 hodin, vysokému obsahu písku a prachu ve vzduchu, vlhkosti vzduchu, dešti
Vlhké i suché tropické klima	T	Všem požadavkům z vlhkého a suchého tropického klimatu (TH a TA)
Klima na souši	U	Všem požadavkům z chladného a vlhkého i suchého tropického klimatu (F a T)
Mořské klima	M	Vysoké vlhkosti vzduchu a vysokému obsahu soli ve vzduchu
Tropické mořské klima	MT	Všem požadavkům vlhkého i suchého tropického a mořského klimatu (T a M)
Mírné, chladné a tropické mořské klima	MU	Všem požadavkům chladného,mořského, vlhkého i suchého tropického podnebí (F, T, M)
Všechny klimatické oblasti na moři i na souši	W	Všem uvedeným klimatům

## 4 Elektrické výboje

### 4.1 Rozdělení výbojů

Výboje rozdělujeme podle doby trvání na přechodné a ustálené. Ustálené výboje můžeme dále rozdělit na výboje samostatné a nesamostatné. Hlediskem tohoto rozdělení jsou podmínky vedoucí ke vzniku a udržení výbojové dráhy. Samostatné výboje nepotřebují zdroj nosičů náboje, jsou tedy schopny samostatné existence. Do této skupiny patří: temný výboj, korónový výboj, doutnavý a obloukový výboj a jiskrový výboj. Nesamostatné výboje potřebují buď zdroj nosičů elektřiny nebo zdroj energie schopný ionizovat atomy popřípadě molekuly ve výbojové dráze.

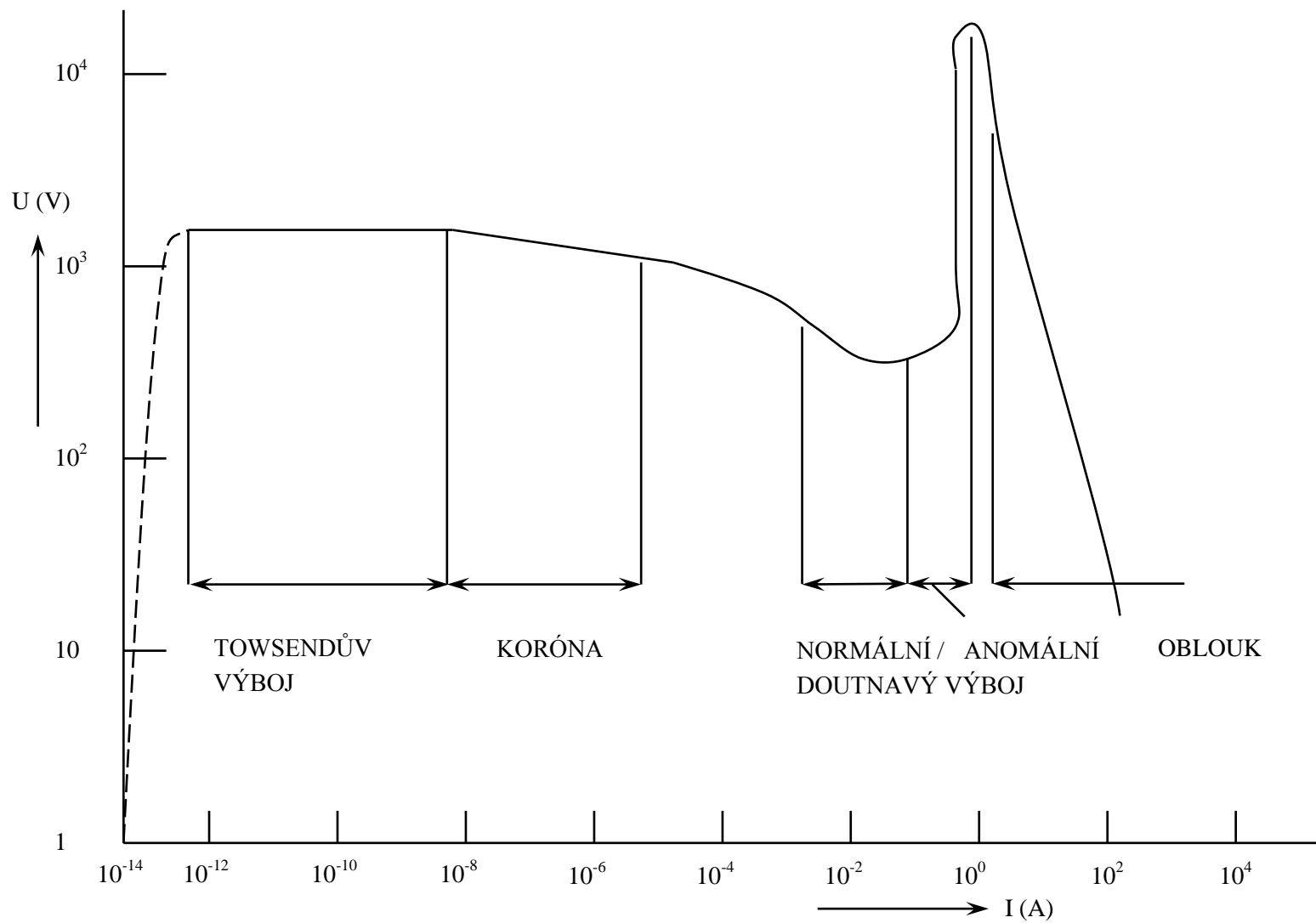
Každý výboj se skládá z elektrod a prostoru mezi elektrodami vyplněného plynem, ve kterém se odehrávají výbojové procesy.

Parametry určující vlastnosti elektrických výbojů jsou:

- Napětí na elektrodách
- Proud tekoucí výbojovou dráhou
- chemické složení plazmatu výboje
- tlak ve výbojové dráze
- způsob chlazení plazmatu
- elementární procesy probíhající ve výbojové dráze
- tvar materiálu elektrod

Závislost napětí na elektrodách na proudu protékajícím výbojem nazýváme charakteristikou výboje. Charakteristika stacionárních výbojů je schematicky zobrazena na obr. 4-1.

Podle velikosti proudu tekoucím plazmatem výboje rozdělujeme stacionární výboje na tři druhy: temný výboj, doutnavý výboj, a oblouk. Charakteristika nakreslená na obr. 4-1. je pouze přibližná, dává pouze řádové velikosti napětí a proudu, jejich přesné velikosti jsou funkcemi jednotlivých parametrů výbojů [13].



Obr. 4-1 Charakteristika stacionárních výbojů

## 5 Částečné výboje

V oblasti vysokého napětí rozlišujeme druhy přeskoků na úplné a neúplné při napětovém namáhání izolace. Úplný přeskok představuje spojení obou elektrod nízkoodporovým výbojem. Tento výboj prorazí celou izolaci. Neúplný průraz nastane, je-li výbojem překlenuta jen část izolace. Vytvoří se pouze částečný průraz. Zbylá neporušená izolace má ještě dostatečnou elektrickou pevnost a napětové namáhání vydrží.

Částečný průraz v plynném izolantu nazýváme částečným výbojem.

Koróna je druh částečného výboje. Objevuje se v plynném prostředí kolem vodičů, jež jsou vzdálené od pevné nebo kapalně izolace. Tento termín není příliš vhodný pro obecné pojmenování všech druhů částečných výbojů.

Vysokonapětové izolace u elektrických strojů (zařízení) může obsahovat nechtěné malé dutinky vyplněné plynem. Tyto dutinky mohou vzniknout především při výrobě nebo při degradaci izolace. Dutinky také vznikají důsledkem extrémního lokálního elektrického namáhání. Se zvyšujícím se napětím, přiloženým na objektu, se objevují při určitém napětí výboje v těchto dutinkách. Viditelné výboje mívají převážně charakter drobných nebo lavinových výbojů.

Částečné výboje jsou v normě ČSN EN 60270 definovány důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace. Takové výboje se objevují jako impulsy s dobou trvání mnohem menší než  $1\mu\text{s}$ .

Částečné výboje, jsou výboje, které překlenují částečně v různé vzdálenosti mezi dvěma póly elektrod zbytek izolace, který je schopen udržet celé provozní, popř. zkušební namáhání. Částečné výboje mohou vycházet přímo z jedné z elektrod, nebo mohou probíhat i v dutině izolantu.

Impuls částečného výboje je proudový nebo napětový impuls. Vzniká jako výsledek přítomnosti částečného výboje, který se objevuje ve zkoušeném objektu. Impuls je měřen pomocí vhodných detekčních obvodů, které jsou začleněny do zkušebního (měřicího) obvodu [4].

### 5.1 Rozdělení částečných výbojů

Částečné výboje můžeme rozdělit na vnější, vnitřní a povrchové (klouzavé) částečné výboje. Vnější částečné výboje jsou částečnými výboji v plynech v okolí elektrod malých poloměrů, nebo zakřivení, jako jsou například doutnavé výboje.

Vnitřní částečné výboje jsou částečné výboje v plynech, obklopené pevným nebo kapalným izolantem, jako jsou například výboje v plynných dutinkách v pevném izolantu.

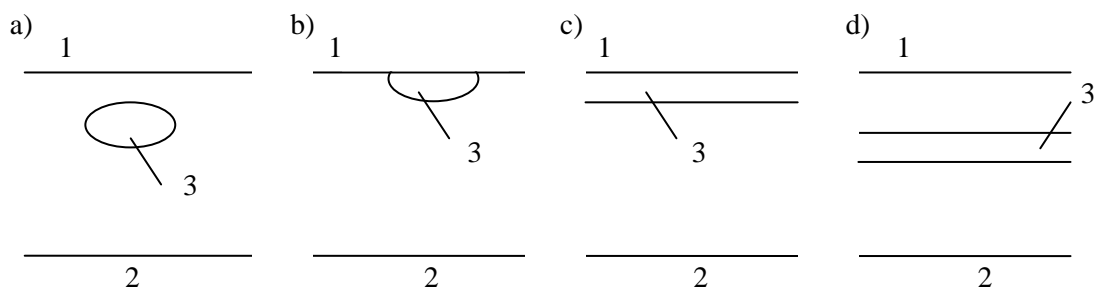
Povrchové částečné výboje jsou částečné výboje vytvořené v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného izolantu. Mohou to být klouzavé výboje při dostatečně velké tangenciální složce intenzity elektrického pole na rozhraní pevného a plynného izolantu [4].

#### 5.1.1 Vnitřní a povrchové částečné výboje

Samotné druhy vnitřních a povrchových částečných výbojů lze modelovat na elektrodových uspořádání znázorněných na obr 5-1. Elektrody jsou označeny číslicemi 1 a 2, oblasti výbojové činnosti částečných výbojů jsou označeny číslicí 3.

Pevný izolant, obsahující plynnou dutinku, která může vzniknout při lití epoxidové izolace nebo při tvarování polyetylenového izolantu. Tato dysfunkce je zobrazena na obr.5-1a. Jestliže dojde k odtržení izolace od elektrody, vznikne povrchová dutinka znázorněná na obrázku obr. 5-1b. Vytvoří-li se mezera mezi elektrodou a pevným izolantem nebo uvnitř izolantu. Příklad této tzv. delaminace izolace je na obrázcích obr. 5-1c, d [5].

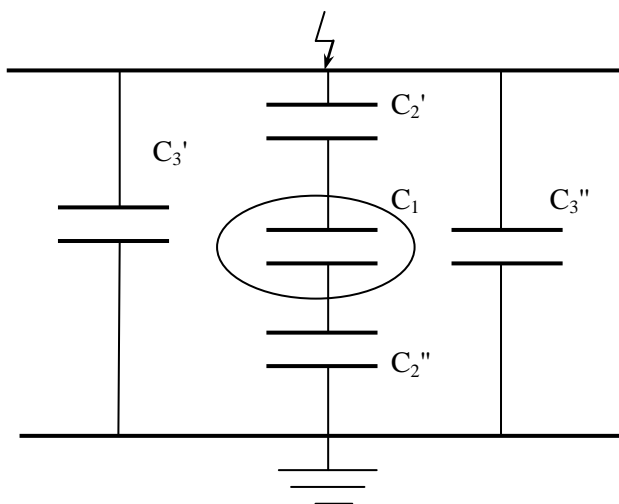




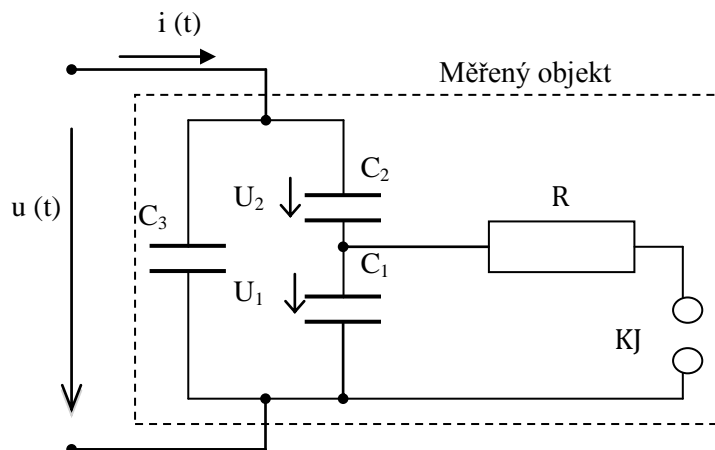
*Obr. 5-1 Typické uspořádání částečných výbojů*

Jednoduchý model pro vnitřní částečné výboje (tzv. trojkapacitní model) je znázorněn na obr. 5-2. Na obrázku je schematicky zobrazen pevný izolant s vnitřní dutinkou tvořenou plynem.

Jeho zjednodušené náhradní schéma je na obr. 5-3. Kapacita plynové dutinky je  $C_1$ ,  $C_2$  vyjadřující kapacitu zbytkové části zdravé izolace v sérii s dutinkou.  $C_3$  představuje poměrně velkou kapacitu zbytku izolantu. Kulové jiskřiště KJ paralelně připojené ke kondenzátoru  $C_1$  má vytvořit v náhradním obvodu přeskok v plynné dutince při překročení její elektrické pevnosti. Odpor  $R$  určuje odpor výbojové cesty po přeskoku na kulovém jiskřišti KJ. Je to vlastně odpor cesty proudu výboje v oblasti vybíjených plošek povrchu dutinky a odpor dráhy výboje. V malých prostorech, jaké tvoří skutečné dutinky v izolaci, proběhne tento děj v jednotkách ns [4].



*Obr. 5-2 Jednoduchý model vnitřního částečného výboje*



Obr. 5-3 Zjednodušené náhradní schéma částečného výboje

Přiložíme-li na svorky objektu 1 a 2 střídavé napětí  $u(t)$  pokud nedojde k přeskoku v dutince (kulovém jiskřišti KJ), je průběh napětí  $u_{10}(t)$  na kondenzátoru  $C_1$  dán vztahem

$$u_{10}(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t) \quad (\text{V; F, V}) \quad (5.1)$$

Časový průběh sinusového napětí  $u(t)$  a fiktivního napětí  $u_{10}(t)$  na dutince bez přeskoků je na obr. 5-4. Při dosažení napětí v dutince, které se rovná napětí zapalovacímu (průraznému) napětí  $U_z$  dutinky dojde k průrazu v dutince. Za zjednodušujících předpokladů, že dutinka má stejné zapalovací napětí  $U_z$  bez polaritního efektu. Platí zde  $|+U_z| = |-U_z|$ . Zbytkové (zhášecí) napětí na dutince po přeskoku je rovno nule. Průběh napětí  $u_1(t)$  na dutince (kondenzátoru  $C_1$ ) je znázorněn na obr. 5-4.

Následkem opakovaných přeskoků v dutince izolantu se na kapacitní proud  $i(t)$ , protékající objektem (izolačním systémem), superponují proudové impulsy vzniklé částečnými výboji, jak je vidět na obr. 5-5.

#### Shrnutím dostaneme následující závěry:

- Počet výbojů vzrůstá s velikostí napájecího napětí, jejich amplituda se nemění, zůstává přibližně stejná.
- Proudové impulsy částečných výbojů dosahují v různých periodách různé polarity.
- Náboj  $\Delta q_i$ , vybitý v dutince izolantu jako částečný výboj se liší od zdánlivého náboje  $q$  impulsu měřitelného na svorkách objektu (vzorku) [4].

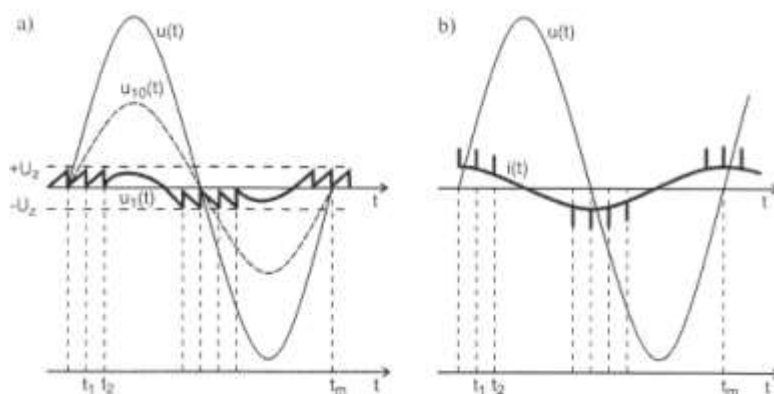
Náboj vybitý v dutince je

$$\Delta q_1 = (C_1 + C_2) U_z \quad (\text{C; F, V}) \quad (5.2)$$

a zdánlivý náboj (měřený na svorkách vzorku) je

$$q = C_2 U_z \quad (\text{C; F, V}) \quad (5.3)$$

Pokud je poměr  $C_1/C_2$  neznámí (složitější izolační uspořádání), pak není možné určit přesnou hodnotu náboje v dutince a při vyhodnocování zdánlivého náboje na svorkách objektu. Zdánlivý náboj pracuje vždy pouze s relativní hodnotou náboje vybitého v dutince [4].



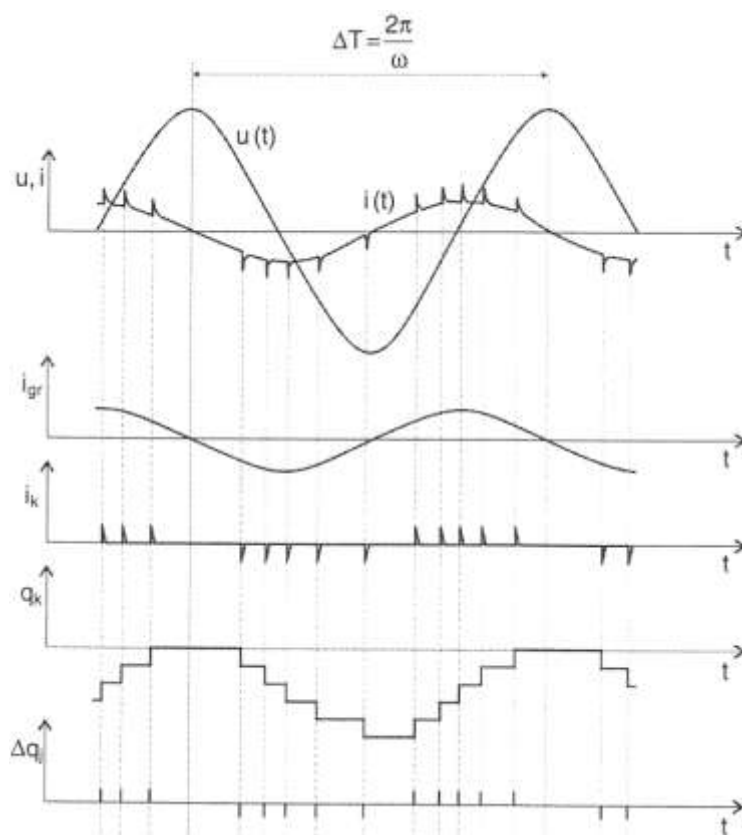
Obr. 5-4 Časové průběhy napětí a proudů (vnitřní částečné výboje) [4]

Tento popis částečných výbojů je proveden za zjednodušujících předpokladů. V reálných podmínkách platí:

Zapalovací napětí  $U_z$  v dutince izolantu nejsou v obou polaritách shodná  $|+U_z| \neq |-U_z|$  a mohou se měnit.

Zbytkové napětí po výboji v dutince není nulové. Mění se pole polarity napětí.

Při průrazu plynu v dutince se uplatňují další efekty. Např. Townsendovy výboje, závislost výbojové činnosti v plynech na tlaku (Paschenův zákon), polaritní efekty aj [4].

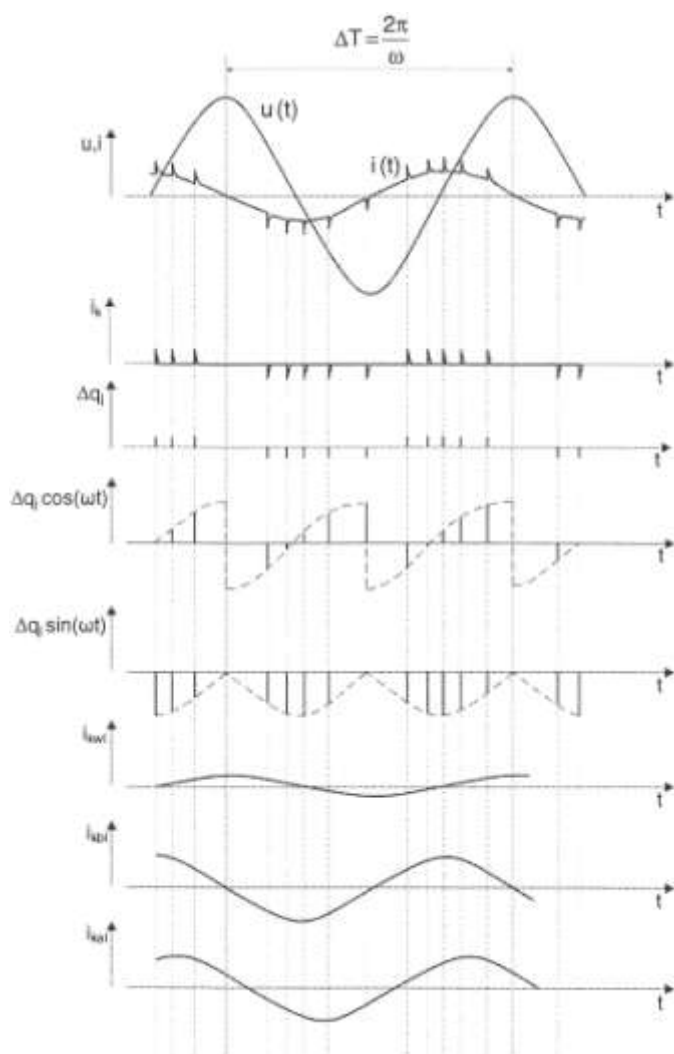


Obr. 5-5 Časové průběhy zdánlivého náboje  $q_k$  a  $\Delta q_i$  jednotlivých impulzů částečných výbojů [4]

Schematická ukázka sledů impulsů proudu a napětí na kapacitním vzorku je na obrázku 5-4. Střídavé napětí je vyšší než počáteční napětí částečných výbojů vytváří celkový proud  $i(t)$  protékající izolací. Proud je tvořen složkou kapacitní  $i_{gr}(t)$  a složkou impulsní  $i_k(t)$ , vyvolanou činností částečných výbojů [4].

$$i(t) = i_{gr}(t) + i_k(t) \quad (5.4)$$

Základní složka proudu  $i_{gr}(t)$ , je daná průchodem střídavého napětí kapacitním izolantem, není pro vyhodnocování výbojové činnosti podstatná a snažíme se ji odfiltrovat. Impulsní složka  $i_k(t)$ , daná sledem proudových impulsů od částečných výbojů, je tvořená řadou impulsů podle polarity napájecího napětí a vyhodnocování těchto impulsů je základem vyhodnocování výbojové činnosti. Na obr. 5-5 je dále vynesena zdánlivý náboj  $q_k$  ( $q_k = \int i_k dt$ ) a  $\Delta q_j$  jednotlivých impulsů částečných výbojů [4].



Obr. 5-6 Časové průběhy činného proudu ( $i_{kwl}$ ), jalového proudu ( $i_{kbl}$ ) a celkového proudu ( $i_{ksl}$ ) impulsů částečných výbojů [4]

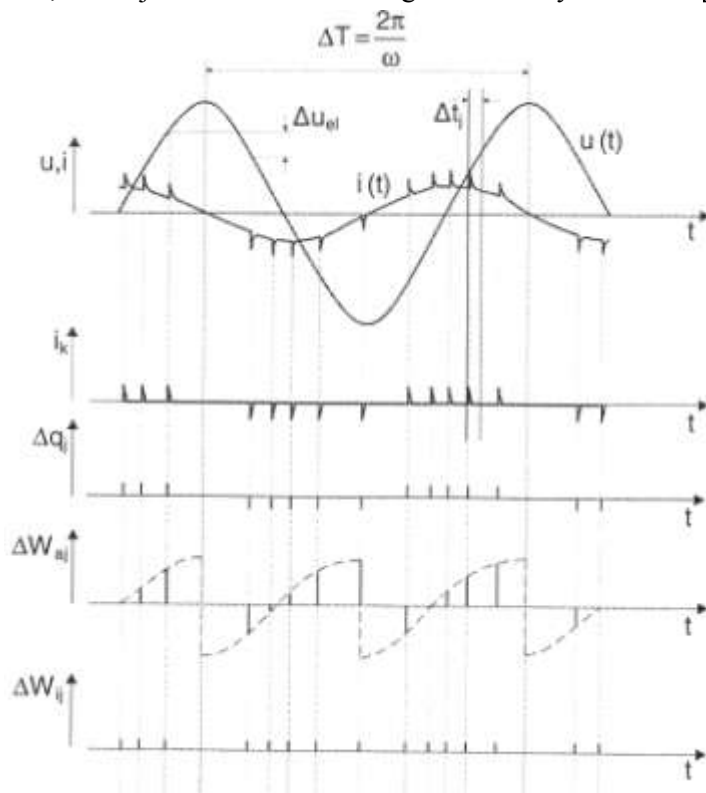
Činný proud  $i_{kwl}$ , jalový reaktanční proud  $i_{kbl}$  a celkový proud  $i_{ksl}$  impulsů částečných výbojů je pak zobrazen na obr. 5-6.

Na obr. 5-7 je schematicky zobrazena energie odpovídající jednotlivým impulsům částečných výbojů. Jednotlivé zdánlivé náboje částečných výbojů  $\Delta q_j$  jsou vynásobeny

okamžitou hodnotou přiloženého napětí  $u(t_j)$  a dávají tak energii měřenou na svorkách objektu  $\Delta W_{aj}$ , která je dodávána ze zdroje do vzorku izolace v čase  $t_j$

$$\Delta W_{aj} = \Delta q_j u(t_j) \quad (3.5)$$

Vnější energetické impulsy  $\Delta W_{aj}$  (energie měřená na svorkách objektu) mohou být kladné nebo záporné podle toho v jaké polaritě napájecího napětí impuls částečného výboje nastal. Vnitřní energetické impulsy  $\Delta W_{ij}$  (energie zmařená v dutince izolantu) jsou vždy kladné, ale nelze je přímo změřit, protože měřený subjekt (dutinka) je nepřístupný. Vztah mezi energií  $\Delta W_{aj}$ , měřenou na svorkách objektu, a energií  $\Delta W_{ij}$ , zmařenou v dutince, nelze obecně určit, neboť je dán konkrétní konfigurací dutinky a izolantu [4].

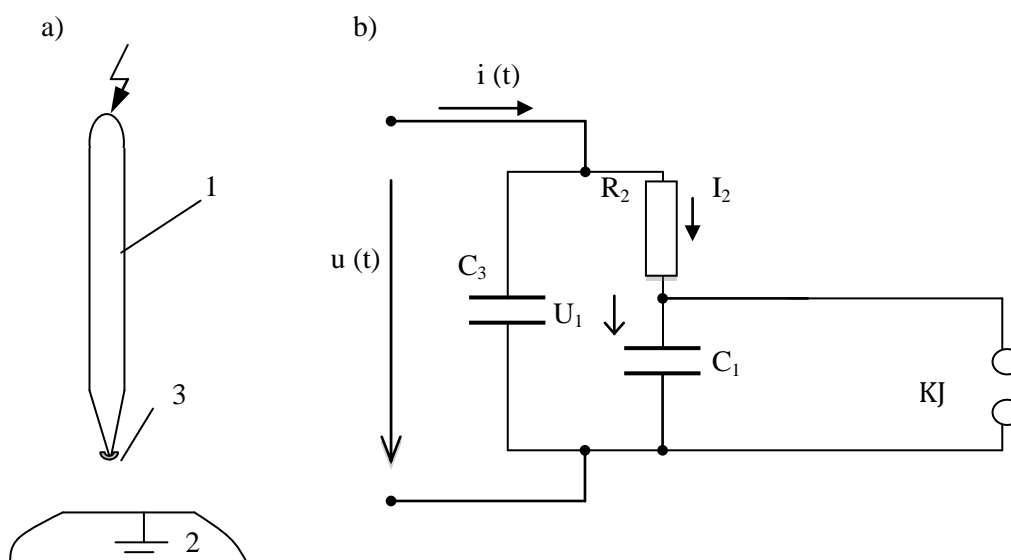


Obr. 5-7 Časové průběhy energie odpovídající jednotlivým impulsům částečných výbojů [4]

### 5.1.2 Vnější částečné výboje

Vnější částečné výboje se vyskytují nejčastěji na hranách nebo na malých poloměrech elektrod, které se nacházejí v plynném prostředí. Typické uspořádání pro vnější částečné výboje je uspořádání hrot a deska je vidět na obr. 5-8, kde se částečné výboje objevují na ostrém zakončení hrotové elektrody. Elektrody jsou značeny číslicemi 1 a 2, oblast částečných výbojů je pak značena číslicí 3.

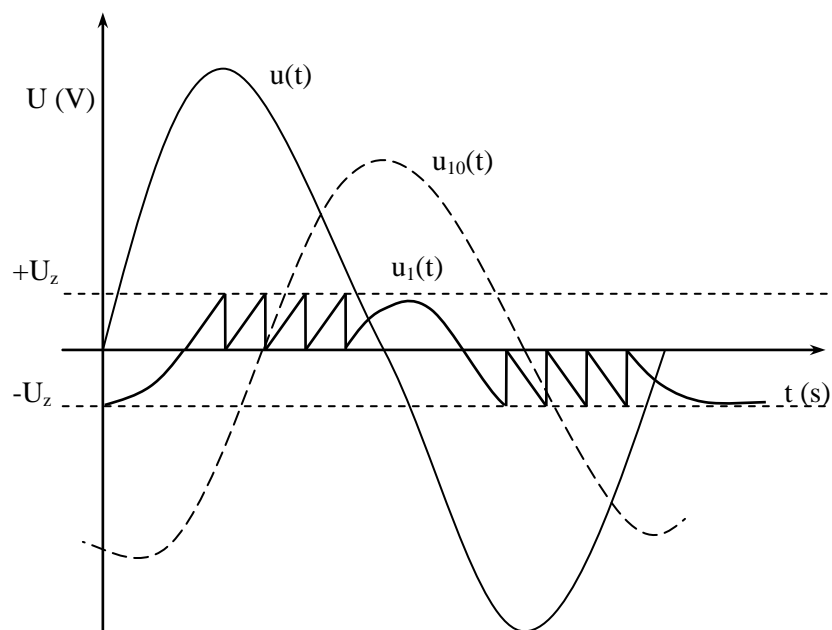
Schéma elektrodového uspořádání hrot a deska s vnějšími částečnými výboji a jeho zjednodušené náhradní schéma znázorňuje obr. 5-8a. Kondenzátor C1 reprezentuje kapacitu vzduchového prostoru, který je úplně zkratován vždy, když dojde k částečnému výboji, tj. když napětí dosáhne přeskokové hodnoty  $U_z$  na obr. 5-8b reprezentováno přeskokem na kulovém jiskřišti KJ). Náboj vytvořený na hrotu výboje putuje vlivem elektrického pole k elektrodě opačné polaroty a jeho vodivost je v náhradním obvodu charakterizováno odporem R2. Kondenzátor C3 je pak paralelní kapacita elektrodového uspořádání [4].



Obr. 5-8 Elektrodové uspořádání hrot deska a náhradní schéma pro vnější částečné výboje

Z náhradního obvodu plyne, že vnější částečné výboje se v oblasti zvýšené intenzity elektrického pole objevují v široké škále hodnot v závislosti na okamžité hodnotě intenzity elektrického pole. V oblasti intenzity elektrického pole menší, než je prahová hodnota pro vznik částečných výbojů, se pak částečné výboje nevyskytují.

Na obr. 5-9 jsou průběhy napájecího napětí  $u(t)$ , fiktivních napětí  $u_{10}(t)$ , tj. napětí na kapacitě C1 (vzduchový prostor, který je zkratován vždy, když dojde k částečnému výboji) v případě že by nedošlo k částečnému výboji, a skutečnému průběhu napětí  $u_1(t)$  na této kapacitě, tj. při existenci částečných výbojů. Částečné výboje nastávají v okamžiku, kdy okamžitá hodnota napětí na kapacitě C1 dosáhne limitní hodnoty  $(+U_z, -U_z)$  [4].



Obr. 5-9 Časové průběhy napětí (vnější částečné výboje)

## 6 Popis systému klimatické komory

Klimatická komora byla zkonstruována o rozměrech 710x3000x800 mm. Na řídicím panelu je možné nastavit vypnutí topení nebo vypnutí chlazení. Odmrazování lze nastavit na ruční nebo automatické. Odmrazování v ručním režimu se zapíná okamžitě po nastavenou dobu. Odmrazování se v automatickém režimu zapne po zadané době odmrazování po nastavenou dobu. Po nastavení lze zapnout test odmrazování.

Musíme nastavit teplotní rozsah žádanou hodnotou topení a žádanou hodnotou chlazení. Posledním a neméně důležitým krokem je nastavení doby (hod:min) za jak dlouho se má provést odmrazení a jak dlouho (min:sec) bude odmrazování probíhat.

Na řídicím panelu je možné za provozu sledovat aktuální teplotu ve °C, aktuální relativní vlhkost v %, stav zařízení ve kterém se aktuálně nachází.

U aktuálně probíhajícího topení zobrazuje TOPENI, u aktuálně probíhajícího chlazení zobrazí CHLAZ. Jestliže pro provozu nezobrazuje nic, v tom případě není zapnuto ani topení, ani chlazení.

Na sekundární stranu jednofázového transformátoru  $22\text{kV}/\sqrt{3}/100\text{V}/\sqrt{3}$  V je přivedeno napětí ze zdroje (auto-transformátor) 380/220V. Měření bude probíhat v klimatické komoře. Závěsný izolovaný vodič je připojen na primární stranu měřícího transformátoru napětí. Závěsný vodič je připevněn na podpěrných izolátorech vn v klimatické komoře. Všechny izolátory jsou pečlivě uzemněny. Vodič se nesmí nijak dotýkat země. Vodič je na druhé straně přes odpor uzemněn. Na závěsném izolovaném vodiči je přímo umístěna snímací cívka. Ta slouží ke snímání rozptylového toku elektrického pole. Kapacitní dělič je připojen na snímací cívku. Ke kapacitnímu děliči je připojen paralelně boční odpor. Toto zapojení tvoří derivační článek, který funguje jako pásmová propust vyšších řádů. Dále je signál veden přes přepěťovou ochranu na digitální osciloskop. Signál je dále zpracován v počítačovém programu Labview. Pomocí úpravy signálu a filtrů můžeme určit střední hodnotu TRMS.



## 6.1 Použité komponenty

### *Měřicí transformátor napětí VTS 25*

Přístrojový transformátor napětí je jednofázový jednopólový izolovaný transformátor určený k použití v sítích vysokého napětí. Je určen k měření a jistění rozvodných zařízení vn vnitřního provedení. V modelu klimatické komory je bez vn pojistky.



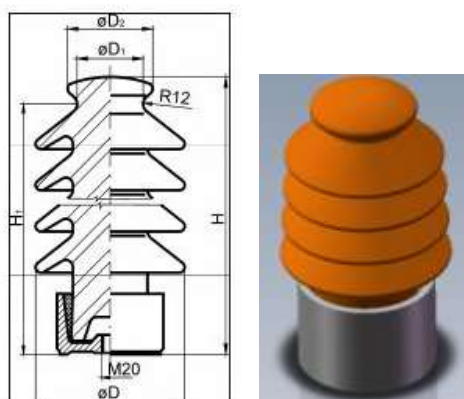
Izolační napětí	25 kV
Zkušební napětí	50 kV
Zkušební napětí rázové	125 kV
Jmenovité primární napětí	$3000/\sqrt{3} - 22000/\sqrt{3}$ V
Jmenovité sekundární napětí	$100/\sqrt{3}$ , $110/\sqrt{3}$ , $120/\sqrt{3}$ V
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Výkon	10, 30, 50, 75, 100, 150 VA
Třída přesnosti	0.2, 0.5, 1, 3P, 6P
Krajní výkon	500 VA

Obr .6-1 Měřicí transformátor napětí VTS 25 s elektrotechnickými parametry [14]

### *Podpěrný keramický izolátor vn VPA 135*

Izolátory jsou určeny pro venkovní vedení s jmenovitým napětím 10 – 35 kV o kmitočtu 50 Hz. Materiál tvoří porcelán C 110 dle IEC 60672-3. Provedení dle PN 34 8024

Glazura je hnědá. Armatury jsou vytvořeny z temperované nebo tvárné litiny zinkované v ohni.



Obr .6-2 Podpěrný keramický izolátor vn VPA 135 zhotovený v Solidworks a jeho konstrukční výkres [14]

### *Kapacitní snímač napětí VSO 25*

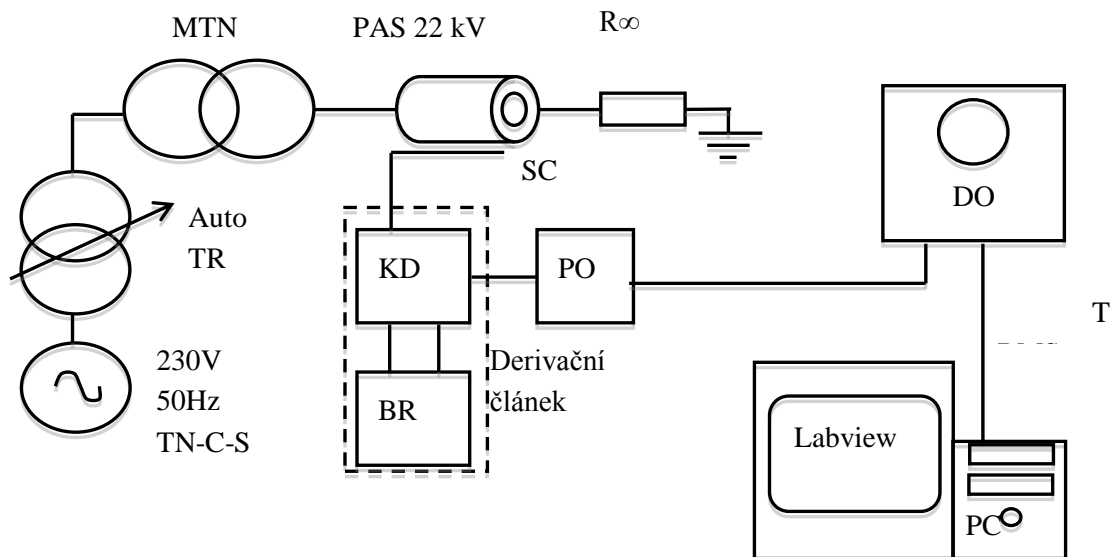
Kapacitní snímač napětí je venkovní jednofázový snímač napětí určený pro snímání napětí na napět'ové hladině 22 kV. Plazivá povrchová cesta odpovídá izolačnímu napětí 25kV pro nejvyšší znečištění ( $31\text{mm } 1\text{ kV}^{-1}$ ).



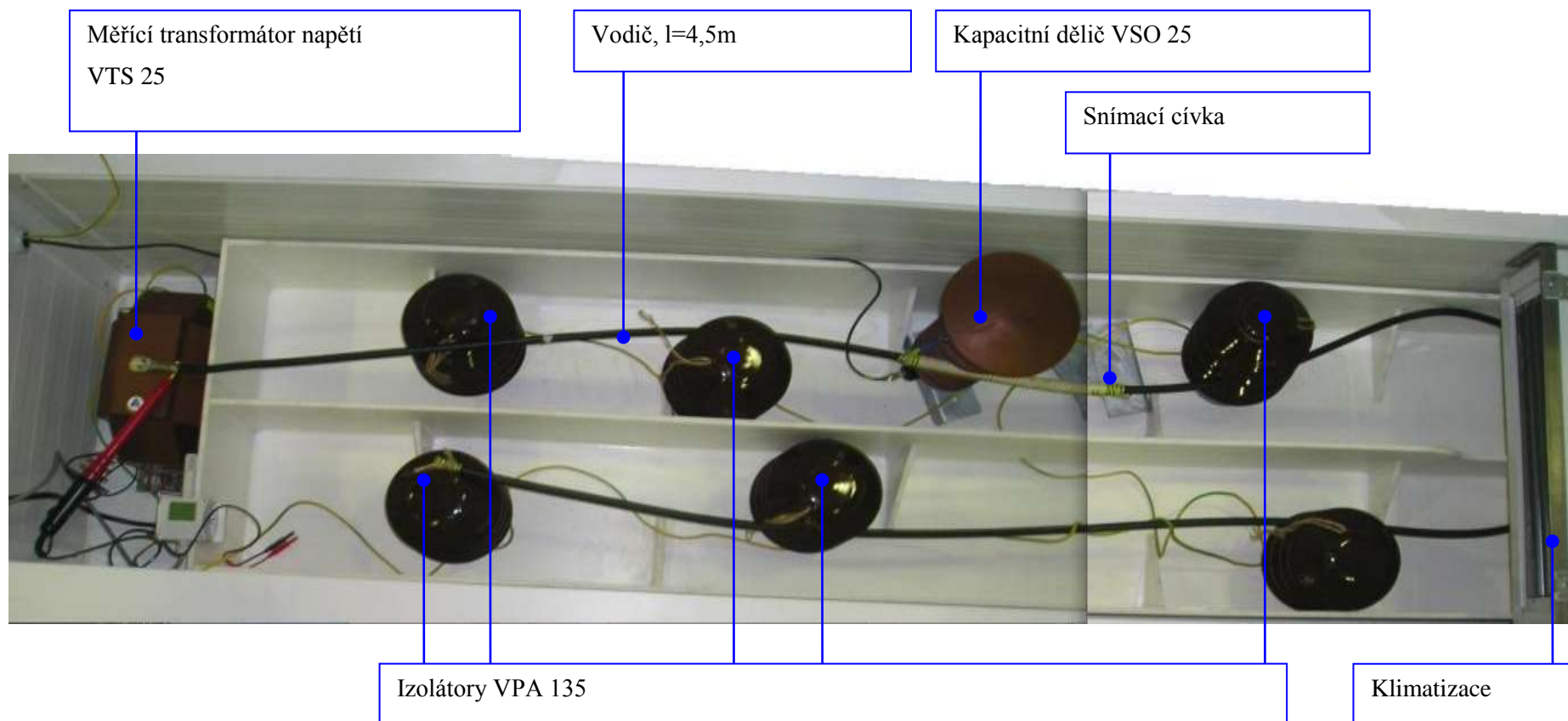
Izolační napětí	25 kV
Zkušební napětí	50 kV
Zkušební napětí rázové	125 kV
Jmenovité primární napětí	$22/\sqrt{3}$ kV
Jmenovité sekundární napětí	0-230V (130 V $\pm 15\%$ pro zátěž 1 M $\Omega$ )
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Snímací kapacita C1	50 až 60 pF
Kapacita stíněného vývodu na metr délky C2	280 pF/m

Obr. 6-3 Kapacitní snímač napětí VSO 25 s elektrotechnickými parametry [14]

Izolovaný závěsný vodič se systémem PAS 22kV. Elektrotechnické parametry jsou popsány v kapitole 3.1.1.



Obr. 6-4. Blokové schéma měřícího pracoviště; Auto TR je auto-transformátor, MTN vn je měřicí transformátor napětí na vn, PAS 22kV je vzorek izolovaného závěsného vodiče, SC je snímací cívka, KD je kapacitní dělič, BR je boční odpor, PO je přepět'ová ochrana, DO je digitální osciloskop Yokogava, PC je počítač s vyhodnocovacím softwarem Labview



*Obr. 6-5 Klimatická komora s popsanými komponenty*



## 7 Metody detekce částečných výbojů

Výbojovou činnost v izolantu doprovází celá řada fyzikálních jevů elektrického i neelektrického charakteru. Kromě vzniku proudových impulsů jsou jimi také generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, vznik chemických zplodin výbojové činnosti, světelné záření viditelného i ultrafialového spektra, tepelný ohřev okolí a zvukové vlny ve slyšitelném a ultrafialovém pásmu [5].

Právě díky těmto projevům, nebo následkům spojených s jejich existencí lze přítomnost výbojové činnosti detekovat, případně různým způsobem určovat rozsah jejího rozvinutí, či určit místo jejího vzniku.

Metody měření částečných výbojů se obecně rozdělují na metody globální a metody lokalizační. Zatímco globální se zabývají komplexním měřením částečných výbojů v daném zařízení, metody lokalizační se využívají pro hledání místa zdrojové lokality částečných výbojů. Běžně se obě tyto metody kombinují- nejprve se pomocí globální metody určí celková míra výbojové činnosti a v druhé fázi měření se poté pomocí lokalizační metody najde přesné místo působení těchto výbojů [5].

### 7.1 Přímé elektrické metody detekce

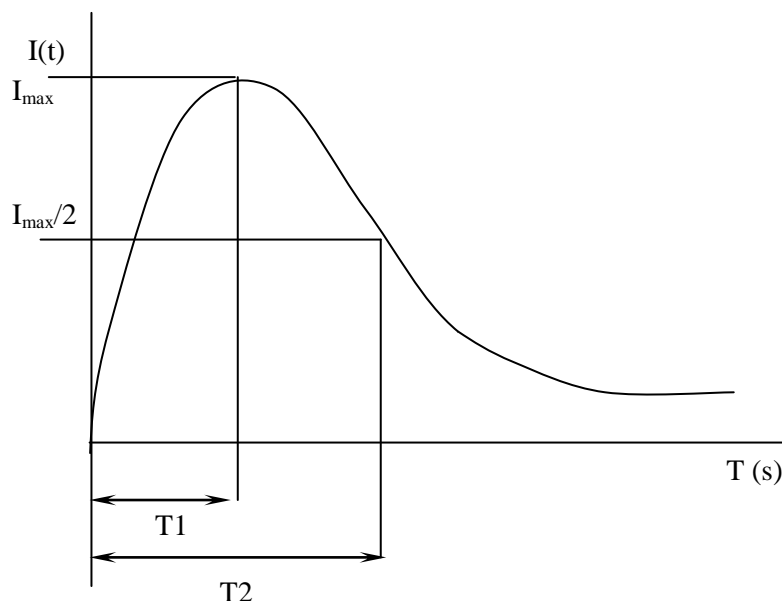
Elektrické metody detekce částečných výbojů jsou založeny na měření proudových impulsů, které provázejí vznik částečných výbojů. Tyto proudové impulsy jsou tedy měřitelnou odezvou sledování výbojových procesů a jejich snímáním vhodným obvodem lze vyjádřit velikost částečných výbojů.

Indukčnost napájecího obvodu nedovolí, aby byl ze zdroje hrazen potřebný úbytek elektrické energie (náboje) vyvolaný výbojem v dutince dielektrika a na svorkách zkoušeného objektu poklesne napětí o jistou danou hodnotu. Tento pokles napětí vyvolaný výbojem je úměrný náboji proudového impulsu výboje. Výboj v dutině dielektrika vyvolává tedy v měřicím obvodu vyrovnávací proud, který na svorkách měřicí impedance vyvolává ekvivalentní odezvu. Takto zaznamenaný impuls napětí je superponován na střídavé napětí zdroje, a proto je vhodné odfiltrovat síťovou frekvenci pomocí vhodného filtru.

Impulzy částečných výbojů mají délku pulzu závislou na materiálu, ve které vznikají. Impulsy výbojů v pevných izolantech trvají kratší dobu, než je tomu u impulsů v kapalinách. Časové hodnoty pro pevný izolant jsou několik ns pro čelo impulsu (doba T1) a několik desítek ns pro dobu půltýlu (doba T2) – *obr. 7-1*. U kapalin se tyto doby zvyšují na cca 1 μs pro čelo a několik μs pro půltýl impulsu [5].

Proudový impuls je znázorněn na *obr. 7-1* a velikost náboje tohoto pulsu je dána plochou pod křivkou jako:

$$Q = \int_0^{\infty} i \, dt \quad (C; A, s) \quad (7.1)$$



Obr. 7-1 Tvar proudového impulsu částečného výboje

### 7.1.1 Globální metoda měření částečných výbojů

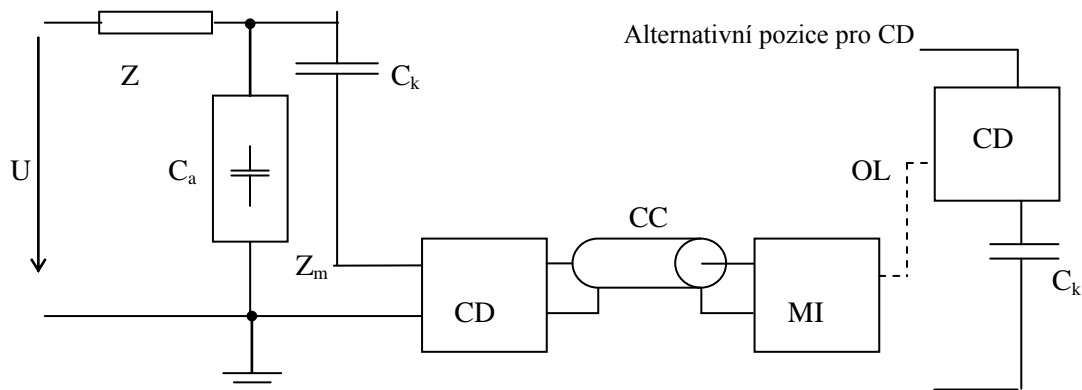
Jednou z nejrozšířenějších metod pro detekci částečných výbojů je globální galvanická metoda, založená na sledování impulsů částečných výbojů s pomocí měřicí impedance. Tato impedance je většinou realizována jako RLC člen s ochrannými prvky proti přepětí a slouží mimo jiné k odfiltrování superpomovaných pulsů částečných výbojů od napájecí frekvence.

Přímé měření částečných výbojů specifikuje norma ČSN EN 60270 a existují tři základní zapojení uvedené na obr. 7-2, 7-3 a 7-4.

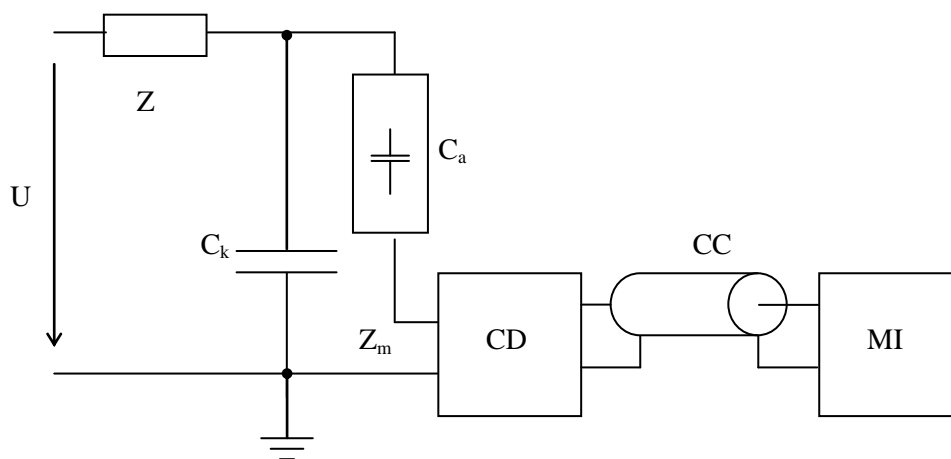
Pro měření uzemněných objektů či objektů o velkých kapacitách se používá měřicí obvod se zapojením impedance do větve vazebního kondenzátoru (obr. 6-2), což umožňuje snímání impulsů částečných výbojů bez větších obav o detekční obvod při možném průrazu zkoumaného zařízení.

Pro měření objektů s možností rozpojení zemního přívodu lze použít měřicí obvod v zapojení podle obrázku obr. 7-3. Výhodou tohoto zapojení je poněkud vyšší citlivosti vlivem rozptylových kapacit, které jsou k  $C_k$  řazeny paralelně a tím ji zvyšují. Je-li rozptylová kapacita obvodu k zemi větší než kapacita měřeného objektu, může být vazební kapacita  $C_k$  v obvodu vynechána.

Pro měření částečných výbojů v místě instalace zařízení je vhodné používat můstkové zapojení na obr. 7-4 pro jeho schopnost potlačení vlivu vnějšího rušení. Tímto postupem se na měřicích impedancích snímají rozdílové proudové impulzy, přičemž měřicí impedance  $Z_m$  a  $Z_{m1}$  jdou individuálně nastavovat. Na pozici vazebního kondenzátoru o kapacitě blízké kapacitě měřeného objektu může stejně dobře posloužit také jiný měřený objekt se známou hladinou částečných výbojů [5].

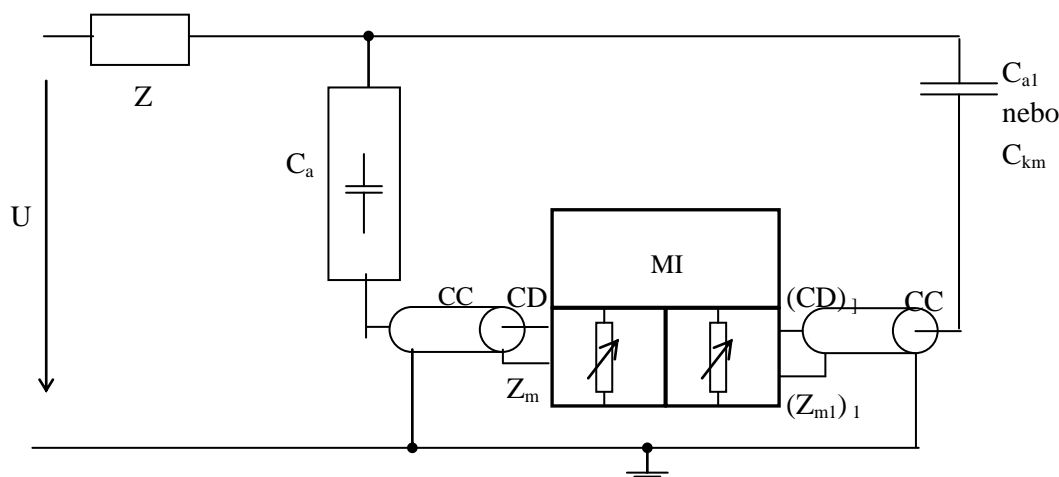


Obr. 7-2 Zkušební obvod s paralelní snímací impedancí



Obr. 7-3 Zkušební obvod se sériovou snímací impedancí

- U      napájecí napětí,
- Z      filtr rušení, zábrana vybíjení částečných výbojů přes impedanci zdroje,
- $C_a$     testovací objekt,
- $C_k$     vazební kondenzátor,
- $Z_m$     snímací impedance,
- CD    vazební zařízení,
- CC    spojovací stíněný kabel,
- MI    detektor,
- OL    optický kabel



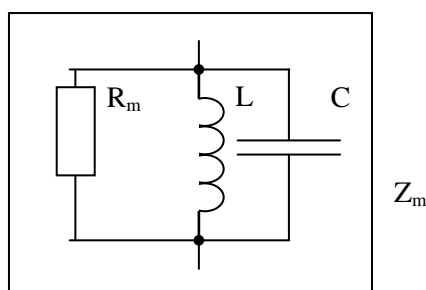
Obr. 7-4 Zkušební obvod v můstkovém zapojení

Důležitou součástí všech tří snímacích obvodů je vysokonapěťový vazební kondenzátor, který musí mít obecně nízkou indukčnost, vysokou kapacitu v porovnání s rozptylovou kapacitou obvodu a dále nesmí vazební kondenzátor vykazovat jakékoli významné částečné výboje v rozsahu měřících napětí. Tento vazební kondenzátor dodává do zkušebního obvodu náboj potřebný na kompenzaci přechodové změny napětí při částečném výboji.

Mezi nesporné výhody galvanických měření patří především vysoká citlivost měření (možnost regulace velikostí vazební kapacity), velká schopnost výpovědi, bezpečí měřeného objektu bez nutnosti jeho nadměrného přetěžování a použitelnost galvanické metody za chodu zařízení (on-line). Nicméně existuje i několik nevýhod, jako např. citlivost na rušivé vlivy (jak na vnější vlivy typu elektromagnetických vln rádiových vysílačů, tak i na vnitřní vlivy způsobené samotnými prvky v měřícím obvodu) apod [5].

### 7.1.2 Měřicí impedance snímání částečných výbojů

Měřicí impedance, i ideálním případě čistě ohmického charakteru, ve snímacím obvodu je obvykle tvořen čtyřpólem s frekvenční citlivostí zvolenou tak, aby frekvence napětí zdroje neovlivňovala měřicí přístroj. Jak již bylo zmíněno, dobíjecí impulzní proudy vytvářejí na snímací impedanci úbytky napětí odpovídající zdánlivému náboji jednotlivých částečných výbojů. Snímací impedance tak slouží převádění proudových pulsů vyvolaných výboji na výstupní napěťové pulsy vedené do měřícího zařízení [5].



Obr. 7-5 Měřicí impedance



Měřicí impedance může být obecně tvořena rezistorem, paralelním zapojením odporu a kondenzátoru, rezonančním obvodem (obr. 7-5). V případě úzkopásmových měřících obvodů se často používá naladění měřicí impedance na měřicí frekvenci přístroje.

Podle konstrukce snímací impedance a zejména použitého měřícího přístroje (v závislosti na frekvenčním rozsahu měření) lze klasifikovat měřící obvody do dvou skupin: širokopásmové a úzkopásmové.

Úzkopásmové měřicí systémy jsou charakteristické malou šířkou pásma  $\Delta f$ , kde doporučená hodnota  $\Delta f$  leží v intervalu od 9 do 30 kHz. Odezva těchto přístrojů na proudový pulz je zpočátku oscilující, přičemž kladné a záporné vrcholové hodnoty jednotlivých oscilací jsou úměrné vzdálenému náboji a zároveň nezávislé na jeho polaritě, nelze tak bohužel rozlišit polaritu pulzu částečného výboje. Rozlišovací doba  $T_r$  je řádově stovky  $\mu s$  [5].

Častěji používanými systémy pro měření částečných výbojů jsou širokopásmové zařízení. Doporučené hodnoty dolní a horní mezní frekvence  $f_1$  a  $f_2$  a šířka pásma  $\Delta f$  jsou

$$30kHz \leq f_1 \leq 100kHz,$$

$$f_2 \leq 500kHz, \quad (7.3)$$

$$100kHz \leq \Delta f \leq 400kHz \quad (7.4)$$

Odezva těchto přístrojů na neoscilující proudové pulzy je obecně silně tlumená oscilace. Její počáteční nebo největší vrcholová hodnota určuje velikost a polaritu zdánlivého výboje. Rozlišovací doba  $T_r$  je obecně desítky  $\mu s$ .

Charakteristiky měřících obvodů jsou definovány především pomocí následujících parametrů:

#### **Dolní a horní mezní kmitočet $f_1$ a $f_2$**

Tyto mezní kmitočty představují takové hodnoty frekvencí, při kterých poklesne odezva měřícího systému na konstantní vstupní napětí se sinusovým průběhem o 6 dB od maximální hodnoty v propustném pásmu (obr. 7-6).

Jelikož vliv rušení průmyslovou sítí bývá v praxi velmi rozdílný, mohou se objevit problémy při vhodné volbě dolní hraniční frekvence. Ve většině případů je volena dolní hraniční frekvence měřicí impedance a zesilovače s filtry okolo 30 až 50kHz. Tato poměrně vysoká dolní hraniční frekvence je nutná především pro potlačení periodických rušivých impulzů způsobených v napájecí síti např. tyristorovými spínači, počítačovými zdroji a pod [5].

#### **Střední kmitočet pásma $f_m$ a šířka pásma $\Delta f$**

Tyto parametry jsou pro všechny druhy měřících systémů definovány vztahem:

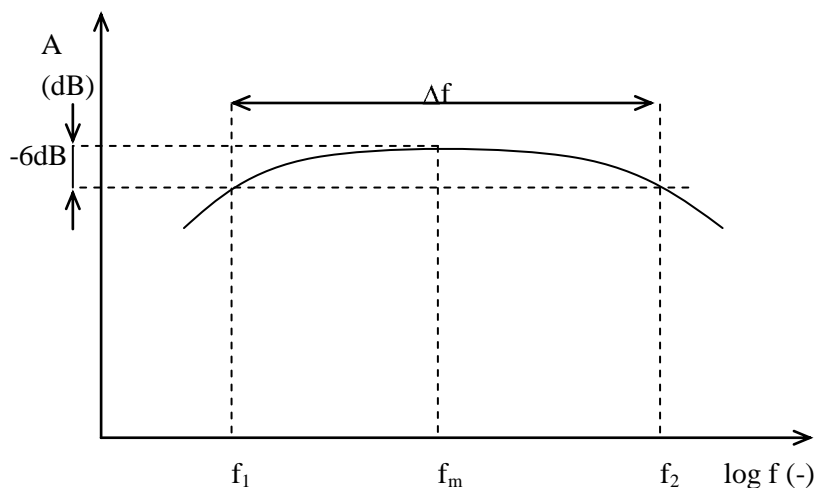
$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (7.5)$$

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (7.6)$$

Rozlišovací doba pulzu  $T_r$

Tato doba představuje nejkratší časový interval mezi dvěma následujícími pulzy krátké délky, stejného tvaru, polarity a velikosti náboje, jež vede k amplitudové chybě nepřevyšující 10%. Tato chyba je způsobená superpozicí zmíněných pulzů, pokud dojde

k jejich překrytí- superpoziční chyba. Rozlišovací doba pulzu je nepřímo úměrná šířce pásma měřicího obvodu a udává se v mikrosekundách. Tuto dobu je doporučeno měřit pro celý testovací obvod, stejně tak i pro měřicí systém, neboť může být způsobena i testovacím objektem, např. špatným impedančním přizpůsobením prvků měřicího řetězce [5].



Obr. 7-6 Typický tvar přenosové frekvenční charakteristiky

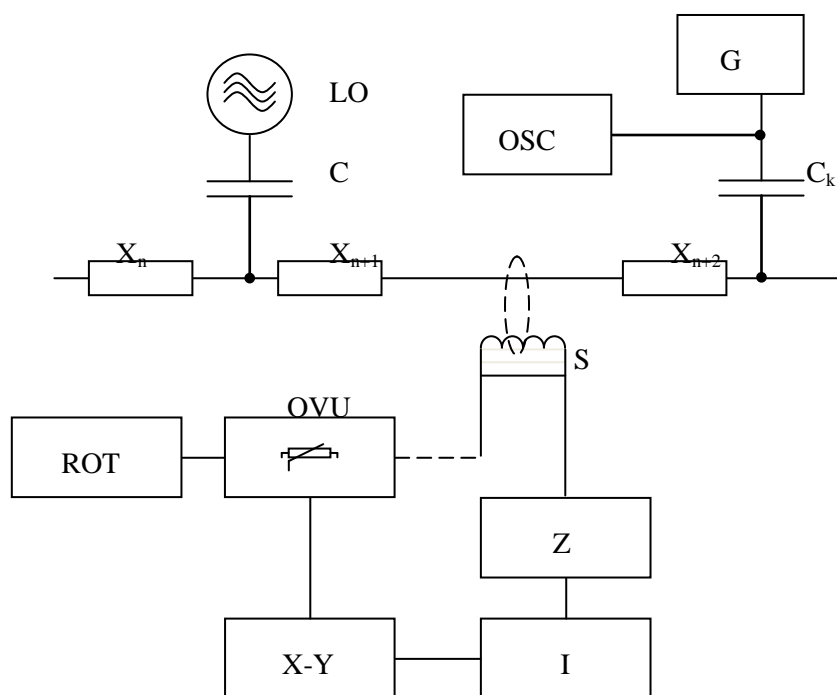
## 7.2 Nepřímé elektrické metody

Nepřímé elektrické metody detekce částečných výbojů jsou založené na skutečnosti, že v místě zdrojové lokality částečného výboje dochází k vyzařování elektromagnetického pole do okolí. Toto elektromagnetické pole je detekovatelné s použitím vhodných snímačů, antén apod [5].

### 7.2.1 Metoda induktivně vázané sondy

Metoda induktivně vázané sondy společně se zařízením pro měření a záznam úrovně výbojové činnosti v elektrických točivých strojích, patří mezi metody lokalizační (tj. pro určování místa výbojové činnosti). Schéma sondy je zobrazeno na obr. 7-7.

Induktivní snímač, přiložený na drážku vinutí, spolu s magnetickým obvodem statoru a vodičem (tyčí) vinutí stroje vytváří proudový transformátor, v jehož sekundárním vinutí (cívka sondy) se indukují pulzy vyvolané dobíjecími proudy částečných výbojů protékajícími v tyči vinutí – tedy v podstatě primárním vinutím tohoto transformátoru [5].



Obr. 7-7 Schéma zapojení induktivně vázané sondy

Měření se provádí na stroji s vyjmutým rotorem. Výstupem metody je grafický záznam se souřadnicemi  $x$  – rozvinutý vnitřní povrch statoru (pořadové číslo drážky),  $y$  kvazivrcholová hodnota zdánlivého náboje, případně střední hodnota zdánlivého proudu. Stav vinutí se hodnotí relacemi mezi aktuální střední hodnotou úrovně výbojové činnosti  $A$  všech drážek a úrovněmi výbojové činnosti  $b_q$  jednotlivých drážek. Drážky s vinutím, které vykazují vyšší úroveň o více než 20 dB, je zapotřebí následně podrobit důkladnějšímu zkoumání [5].

### 7.2.2 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy

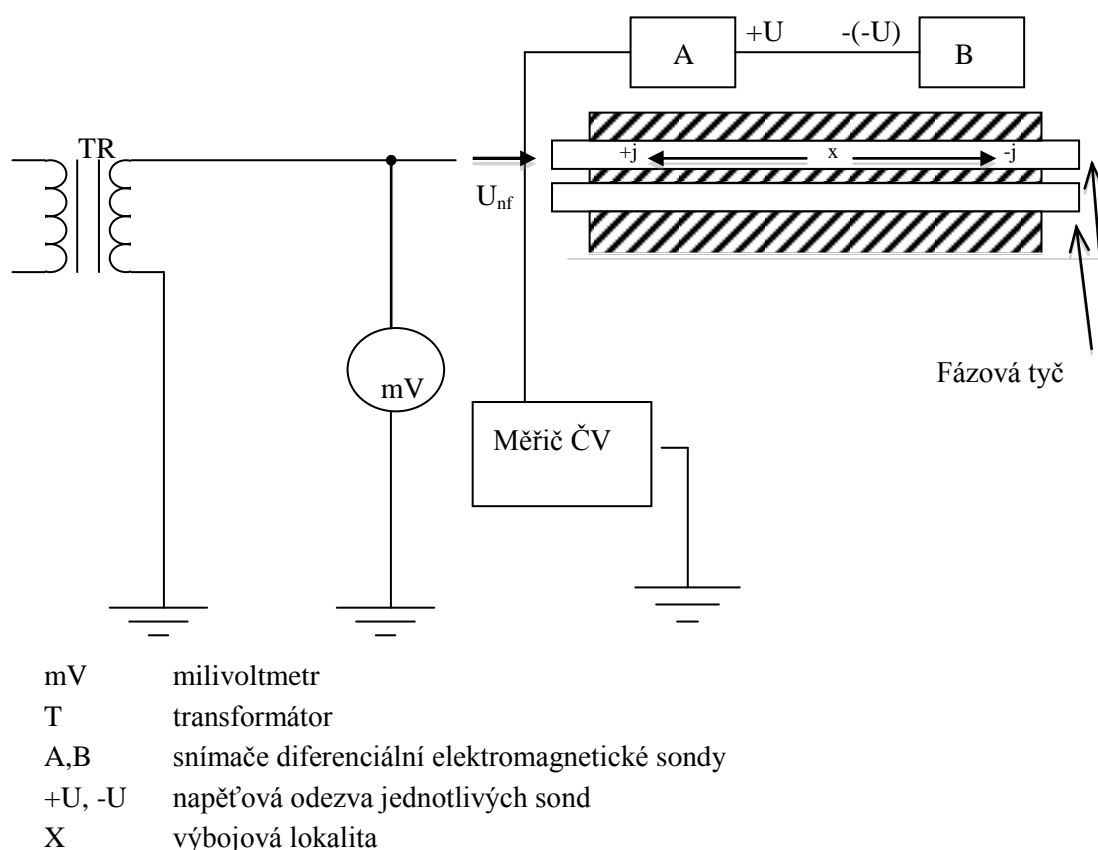
Pro měření částečných výbojů v jednotlivých drážkách zkoumané fáze statorového vinutí točivého stroje se používá metoda diferenciální elektromagnetické sondy, která umožňuje lokalizaci zdroje částečných výbojů.

Diferenciální sondu tvoří dva sériově spojené induktivní snímače, umístěné každý na jednom z konců testované tyče statorového vinutí na obr. 7.8.

Prochází-li proudový impuls oběma sondami stejným směrem, což je případ rušivých signálů, výstupní signály snímačů se navzájem vyruší. Naopak při průchodu dobíjecího impulsu do lokality částečného výboje mezi sondami, který jimi prochází v opačných směrech (víceméně symetricky), se výstupní signál sčítá.

Tímto zapojením se potlačuje vliv cizího rušení a vliv výbojové činnosti v sousedních drážkách.

Kromě vyšetřování částečných výbojů v drážkách je tato sonda použitelná i pro zjišťování částečných výbojů na výstupu vinutí z drážek. Sonden se v tomto případě prokládají v diferenciálním zapojení tak, že je mezi nimi zkoumaná evolventní část vinutí [5].



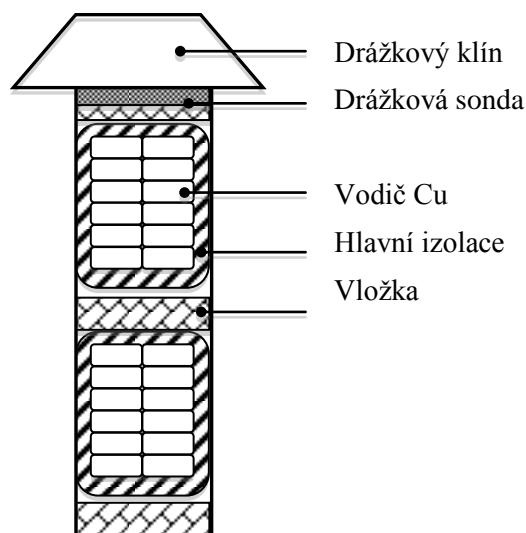
Obr. 7-8 Zapojení diferenciální elektromagnetické sondy

### 7.2.3 Kapacitní drážková sonda

Hlavní myšlenkou kapacitní drážkové sondy (obr. 7-9), umožňující diagnostikovat částečné výboje i za provozu elektrických točivých strojů, je vložení sondy již při výrobě elektrického stroje přímo do jeho statorových drážek pod drážkové klíny. Kapacitní drážková sonda se tak stává pevně zabudovaným kapacitním snímačem vysokofrekvenčních elektromagnetických pulzů generovaných částečnými výboji v dané drážce elektrického stroje.

Kapacitní drážková sonda je tvořena nosnou izolační destičkou opatřenou stínící měděnou vrstvou (orientovanou směrem do vzduchové mezery) na straně jedné a snímačem (úzký měděný pásek) na straně druhé. Šířka sondy odpovídá šířce drážky statoru a její délka odpovídá  $\frac{1}{4}$  délky vlny příslušné k žádané frekvenci odezvy snímače.

Koaxiálními kabely se pak signály přenáší ze sondy k vyhodnocovacímu zařízení. Sonda je díky tomuto uspořádání schopna rozpoznat zdroj částečných výbojů přicházejících od čel vinutí nebo z vnitřku drážky stroje. Snímaná šířka pásma této sondy je 10 MHz až 1000 MHz. Drážková sonda má řadu výhod, mezi které patří mj. Necitlivost vůči okolnímu rušení a především schopnost měření za provozu stroje [5].



Obr. 7-9 Drážková sonda

#### 7.2.4 Kapacitní snímače

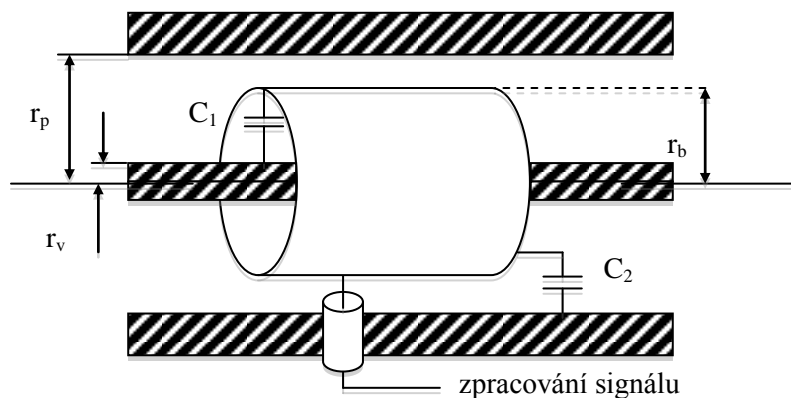
Jedním z používaných typů kapacitního snímače např. pro detekci výbojové činnosti v kabelech, kabelových koncovkách a spojkách je snímač koaxiálního tvaru (obr. 7-10). Kapacity tohoto snímače jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{r_b}{r_v}} \quad (\text{F}) \quad (7.7)$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{r_p}{r_b}} \quad (\text{F}) \quad (7.8)$$

Kde  $l$  je délka sondy,  $r_v$  je poloměr vodiče,  $r_b$  je poloměr snímače,  $r_p$  je poloměr vnějšího pláště kabelu.

Koaxiální kapacitní sondy se používají hlavně pro měření na kabelových koncovkách či v zařízení zapouzdřených rozvoden. Jednou z nevýhod těchto kapacitních sond je pak bohužel nemožnost určit elektricky odstíněné zdroje částečných výbojů a nutnost přerušení silového obvodu v okamžiku jejich aplikace [5].



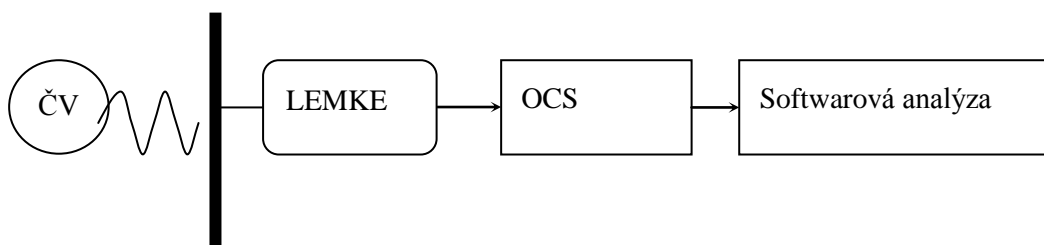
Obr. 7-10 Schéma kapacitní sondy

### 7.2.5 LEMKE sonda

Jak již bylo řečeno, elektromagnetické pole emitované částečnými výboji v defektním místě izolačního systému je možné zachytit pomocí vhodných kapacitních a induktivních snímačů, antén apod.

Elektromagnetické pole je v tomto případě snímáno senzorem, který tvoří plošná kapacitní nebo lineární induktivní sonda zapojená na vstup rychlého diferenciálního zesilovače. Vstup zesilovače je navrhnut tak, aby v maximální míře potlačoval vliv cizích rušivých polí. Měřicí systém je založen na principu širokopásmového zesílení impulzů částečných výbojů a na následné elektronické integraci pro vyhodnocení zdánlivého náboje. Získaný výstupní signál má amplitudu odpovídající zdánlivému náboji a unifikovaný tvar s dobou náběhu 2  $\mu$ s a dobou trvání 50  $\mu$ s. Výstupní signál zesilovače je přiveden do osciloskopu a průběh zaznamenán a uložen. Je také možné zvolit přenos signálu ze zesilovače do osciloskopu pomocí optického kabelu.

Na obr. 7-11 je znázorněn zpracovaný výstup výbojové činnosti snímáný Lemke sondou s kapacitním snímačem [5].



Obr. 7-11 Blokové schéma detekce částečného výboje detekovaného sondou LEMKE

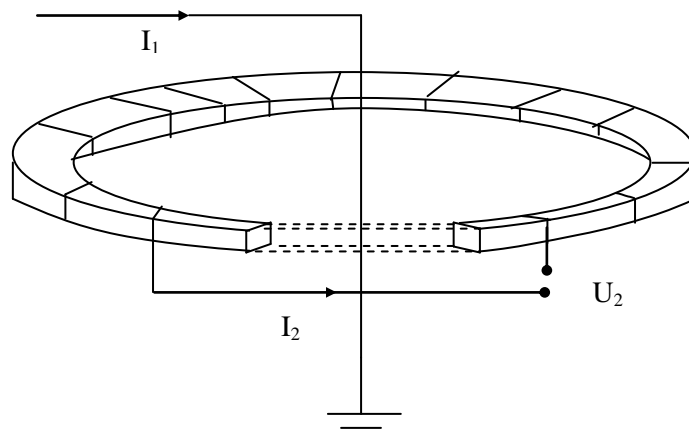
### 7.2.6 Induktivní snímače

Pro snímání impulzních dobíjecích proudů částečných výbojů protékajících v přívodu uzemnění měřicího elektrického obvodu je možné využít induktivní vazbu. Pro tuto detekci se používají vhodné induktivní snímače umístěné v místě pracovního uzemnění daného zařízení.

Tento způsob je vhodný jednak z hlediska ochrany měřicích systémů před přepětím v případě průrazu izolace (při průrazu není vysoké napětí přítomné přímo na vstupu měřicího přístroje), jednak není nutné použít měřicí impedance. Další podstatnou výhodou je možnost použít tohoto druhu detekce výbojové činnosti pro on-line měření.

Podle typu magnetického obvodu lze používané induktivní snímače rozdělit na toroidní a lineární.

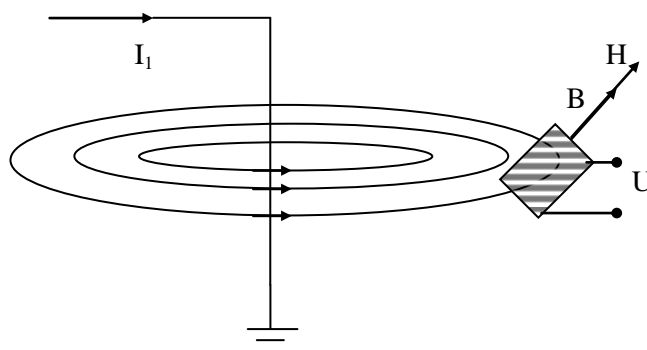
V případě toroidních snímačů je vodič zemnicího spojení umístěn ve středu toroidu (obr. 7-12) a tvoří tak primární vinutí. Vinutí navinuté na samotném toroidu pak tvoří sekundární vinutí. Umístění snímače okolo zmíněného zemnicího přívodu je nejpoužívanějším zapojením při používání těchto snímačů pro detekci částečných výbojů. Jádrem toroidu je obvykle tvořeno z magneticky měkkého materiálu [5].



Obr. 7-12 Schéma zapojení toroidní indukční sondy

Lineární indukční sondy se na rozdíl od toroidních umísťují do elektromagnetického pole vyzařovaného signálu tak, aby podélná osa snímače byla orientována souhlasně s vektory magnetické indukce  $B$  a intenzity magnetického pole  $H$  (obr. 7-13).

Na rozdíl od toroidních sond není pro jejich aplikaci nutné přerušovat elektrický obvod zkoumaného zařízení. Toho se s výhodou využívá při provozních měřeních např. s použitím již zmíněné Lemke sond, na jejíž vstup je připojen právě lineární indukční snímač detekující signály částečných výbojů, např. také na zemním přívodu zkoumaného zařízení [5].



Obr. 7-13 Schéma zapojení lineární indukční sondy

### 7.3 Neelektrické metody detekce

Neelektrické metody detekce jsou založeny na snímání neelektrických projevů částečných výbojů, jako je vznik chemických vzplodin výbojové činnosti, světelné záření viditelného i ultrafialového spektra, tepelný ohřev okolí a zvukové vlny ve slyšitelném a ultrazvukovém pásmu. Tyto fyzikální a chemické projevy lze vhodným způsobem detekovat, lokalizovat a kvantifikovat míru rozvinutí výbojové činnosti.

Pro měření těchto veličin se používají speciální měřicí zařízení (směrové mikrofony v různém frekvenčním pásmu, přístroje pro noční vidění, termovize, plynová chromatografie apod.).

### 7.3.1 Akustická detekce

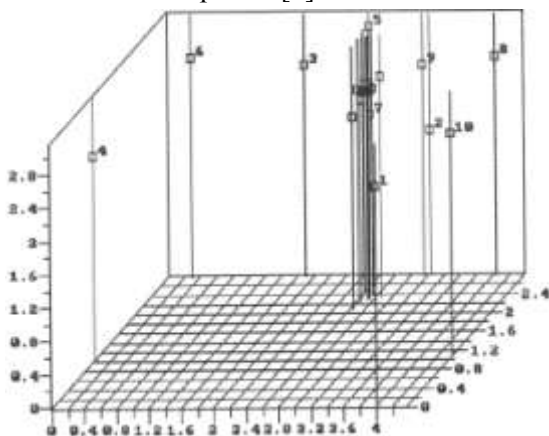
Každý částečný výboj je provázen vznikem akustické emise, zvukových vln širokého spektra frekvencí šířených od místa svého vzniku do okolí. Akustickou detekcí jsou měřeny tyto akustické signály vytvářené částečnými výboji a pro jejich měření jsou používány vhodné mikrofony snímající ve slyšitelném nebo ultrazvukovém pásmu, případně další čidla, např. piezoelektrická.

Způsoby měření akustické emise lze rozdělit podle metod lokalizace místa vzniku částečných výbojů. První možností je použití jediné akustické sondy a postupného hledání místa nejsilnějšího signálu. Druhá metoda spočívá v aplikaci několika pevně připevněných sond a následného softwarového zpracování naměřených dat. Tohoto systému se s výhodou používá např. při on-line měření částečných výbojů v transformátorech.

V průmyslovém prostředí s velkým množstvím okolního hluku je nejčastěji používáno snímání v ultrazvukovém pásmu, protože ultrazvukové vlny jsou krátké, vykazují větší směrovost a jsou spíše charakteristické pro částečné výboje než okolní prostředí.

Lze je tedy snáze rozdělit od rušivého pozadí a přesněji lokalizovat polohu zdroje.

Z tohoto důvodu jsou prakticky měření zaměřena na snímání akustických signálů v této části akustického spektra [5].



Obr. 7-14 Ukázka naměřených hodnot při měření akustickou sondou [4]

### 7.3.2 Optická detekce

Výbojová činnost se opticky projevuje ve viditelném, infračerveném i ultrafialovém spektru. Ve viditelném spektru je tedy přímá výbojová činnost pozorovatelná pouhým okem nebo použitím vhodných optických metod (kamera, fotografie).

Přítomnost výbojové činnosti ve sledovaném zařízení zanechává ovšem také viditelné stopy poškození, které poskytují užitečné informace pro lokalizaci a určení rozsahu působení částečných výbojů. Tyto stopy lze pozorovat buď přímo, nebo s využitím osvětlení ultrafialovým světlem. Tato metoda je ovšem uplatnitelná pouze u přístupných částí zařízení, nebo u částí, ke kterým lze přistupovat po předchozím provedení demontáže zařízení.

Při detekci částečných výbojů v ultrafialovém spektru je používána speciální UV kamera s aplikací selektivních filtrů zvětšujících kontrast. Pro měření je užíván systém snímání dvojitého spektra kombinující ultrafialový senzor s klasickou kamerou. Díky tomu je možné velmi slabé UV vyzařování kolem částí vysokonapětového zařízení detekovat a následně zobrazit na přehledném viditelném pozadí [5].



Přítomnost částečných výbojů se ovšem projevuje také lokálním ohřevem v místech zdrojové lokality částečných výbojů. Aktivita výbojové činnosti je tedy v tomto případě založena na snímání rozložení teploty na povrchu zkoumaného objektu vhodnou termovizní kamerou s velkou citlivostí [5].

### 7.3.3 Chemická detekce

Chemická metoda měření částečných výbojů spoívá v detekci vzniklých produktů při reakcích částečných výbojů s plynem v dutinkách dielektrika a na jejich následné analýze. Chemický detekce je prováděla především v olejem nebo plynem izolovaných přístrojích, kde analýza výše zmíněných produktů výbojové činnosti podává důležité informace o úrovni degradace měřeného zařízení.

Do metod chemické detekce vysokonapětových zařízení je zahrnována plynová chromatografie a metoda indikace ozonu v chladicím médiu. Z důvodu nízké energie částečných výbojů je chemická detekce omezena hlavně na izolační systémy dlouhodobě vystavené částečným výbojům, jako jsou např. olejové náplně transformátorů, prostory s SF<sub>6</sub>, vodíkové chlazení točivých strojů apod [5].

### 7.3.4 Detekce obsahu plynů

Působením částečných výbojů v izolačním systému transformátorů se v prostředí izolačního oleje objevují různé plyny, jejichž analýzou mohou být určeny jednotlivé druhy částečných výbojů. Analýze podléhá přítomnost a vzájemný poměr pěti plynů rozpustných v izolačním médiu, jsou jimi: vodík H<sub>2</sub>, methan CH<sub>4</sub>, ethylen C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, acetylen C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> a propylen C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. Z analýzy těchto plynů je možné určit nejen typ vyskytujících se částečných výbojů, ale z jejich vzájemného poměru lze také určovat druh závady izolačního systému způsobený výbojovou činností. Vztah jednotlivých detekovaných plynů k částečným výbojům popisuje tab. 7-1. Tab. 7-1 představuje určení závad izolace ze znalosti koncentrace těchto plynů.

Pro určení jednotlivých plynů v chladicím oleji nebo plynu se používá plynová chromatografie (princip činnosti chromatografických metod je uveden v kapitole 3). Kromě detekce plynů v oleji transformátorů je sledováno také např. vodíkové chlazení turbogenerátorů [5].

Tab. 7-1 Vztahy plynů rozpuštěných v izolačním médiu

Druh plynu	Vztah plynu k částečným výbojům
vodík H <sub>2</sub>	Základní plyn charakterizující částečné výboje
methan CH <sub>4</sub>	Plyn přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
ethylen C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Plyn vyskytující se pouze při elektrickém oblouku a jiskrových výbojích ve velkých objemech, při částečných výbojích nepřítomný
acetylen C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Plyn přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
propylen C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Plyn vyskytující se pouze při elektrickém oblouku a jiskrových výbojích ve velkých objemech – výbojích – při částečných výbojích nepřítomný

#### 7.4 Elektrická rušení při on-line měření částečných výbojů

Největším problémem při detekci částečných výbojů v režimu on-line je zamezení snímacího rušení, které je vždy přítomné. Při off-line testu je rušení minimální nebo známého charakteru, takže většinou nejsou zapotřebí žádné speciální metody měření oddělující signál od šumu. Naproti tomu on-line metody jsou používány za chodu stroje připojeného do celé napájecí soustavy. Existuje velmi mnoho signálů šířících se soustavou podobných částečných výbojů, patří mezi ně zejména:

- Koróna z přenosového vedení
- Špatné elektrické kontakty na přípojnících zapříčiňující jiskření
- Jiskření sběracích kroužků na stroji
- Hřídlová napětí, proudy a jiskření, vypalování, která tyto proudy způsobují
- Rychlé přechodové děje způsobené pohony s pulzními měniči a počítačovými zdroji.

Pro odlišení užitečného signálu od šumu je využíváno subjektivního sledování experty a odborníky a objektivních měřících metod. Na základě dlouhodobých zkušeností s měřeným objektem jsou experti schopni rozlišit výbojovou činnost od rušení, nicméně tyto postupy jsou neekonomické a zkreslené subjektivními názory expertů [6].

## 8 Veličiny charakterizující částečné výboje

Pro hodnocení aktivity částečných výbojů je nutné určit jejich charakteristické veličiny. Existuje několik měřených a odvozených parametrů, které charakterizují částečné výboje a ty lze rozdělit do několika základních skupin. Zmíněné parametry definuje norma ČSN EN 60270 [5].

### 8.1 Veličiny vztahované k jednotlivým impulsům

#### Zdánlivý náboj $q$ impulsu částečného výboje

Zdánlivý náboj  $q$  impulsu částečného výboje je takový náboj, při jehož mžikovém přivedení na svorky zkoušeného objektu se krátkodobě změní napětí mezi elektrodami na takovou hodnotu, na kterou by se změnilo při částečném výboji. Zdánlivý náboj se nerovná skutečnému náboji  $q_{ev}$ , který je přenesený reálným částečným výbojem, a nemůže být měřen přímo [5].

Jeho velikost se vyjadřuje v pikocoulombech (pC) je základním diagnostickým parametrem pro měření a vyhodnocování částečných výbojů.

#### Fázový úhel $\varphi_i$ a čas $t_i$ výskytu impulsu částečného výboje

Fázový úhel  $\varphi_i$  impulsu částečného výboje je dán vztahem

$$\varphi_i = 360^\circ \cdot P / P_{\text{max}} \quad (^\circ; \text{s}, \text{W}) \quad (8.1)$$

Kde  $t_i$  je okamžitá doba výskytu částečného výboje měřená od předešlého kladného průchodu zkušebnímu napětí nulou a  $T$  je doba periody zkušebnímu napětí.

Vyjadřuje se v úhlových stupních nebo radiánech.

#### Četnost impulsů $n$

Četnost impulsů  $n$  částečných výbojů je střední hodnota počtu proudových impulsů vyvolaných výbojovou činností za dobu určitého časového intervalu. Vyjadřuje se v impulsech za sekundu. V praxi se mohou uvažovat pouze pulsy o velikosti větší, než je minimální předepsaná velikost, nebo jež se nachází v určitém předepsaném intervalu těchto velikostí [5].

### 8.2 Veličiny integrované

Degradace izolačního materiálu vlivem částečných výbojů je často způsobena mechanismem jejich opakování, proto byli do praxe zavedeny i veličiny, které jsou odvozeny od veličin základních jejich sumarizací za určitý časový interval  $T$ , dělený délkou tohoto intervalu

$$I = \frac{1}{T} [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i| + \dots + |q_m|] \quad (\text{C} \cdot \text{s}^{-1}; \text{C}, \text{s}^{-1}) \quad (8.2)$$

Tento proud je vyjádřený v coulombech za sekundu nebo v ampérech, resp. miliampérech [5].

#### Součtový náboj $Q$

Součtový náboj je součet hodnot zdánlivých nábojů za určitý časový interval, obvykle za půlperiodu napájecího napětí. Označuje se  $Q$ , udává se v jednotkách C, resp. pC. V poslední době se od měření a vyhodnocování tohoto diagnostického parametru upouští, resp. nahrazuje se středním proudem částečných výbojů  $I$  [5].

### **Střední kvadratický součet D**

Střední kvadratický součet D je součtem druhých mocnin hodnot zdánlivých nábojů za určitou délku časového intervalu T, děleného velikostí právě této délky:

$$D = \frac{1}{T} [q_1^2 + q_2^2 + \dots q_i^2 + \dots q_m^2] \quad (C^2 \cdot s^{-1}; C^2, s^{-1}) \quad (8.3)$$

Střední kvadratický součet se vyjadřuje v (coulombech)<sup>2</sup> za sekundu [5].

### **Výkon částečných výbojů**

Výkon částečných výbojů P je roven střední hodnotě výzkumu impulsů částečných výbojů přivedeného mezi svorky testovaného objektu po dobu výbojové činnosti T:

$$P = \frac{1}{T} [q_1 u_{cv1} + q_2 u_{cv2} + q_i u_{cvi} + \dots q_m u_{cvm}] \quad (W; C, V, s^{-1}) \quad (8.4)$$

Kde  $u_{cv1}, u_{cv2}, \dots, u_{cvm}$  jsou okamžité hodnoty testovacího napětí, při kterých nastali částečné výboje o velikosti  $q_1, q_2, \dots, q_m$ .

Výkon částečných výbojů je vyjádřen ve wattech a jeho velikost lze mimo jiné určit rovněž přímým měřením. Při střídavém napětí může mimo jiné dojít k situaci, že energie jednotlivých výbojů (součin  $q_i u_{cvi}$ ) nabude záporných hodnot, a to v případě, kdy jsou  $q_i$  a  $u_{cvi}$  opačné polarity. Tento diagnostický parametr se používá jako doplňkový parametr pro hodnocení intenzity výbojové činnosti [5].

## **8.3 Napětí vztahovaná k částečným výbojům**

### **Zkušební napětí částečných výbojů**

Zkušební napětí částečných výbojů je takové zkušebním postupem předepsané napětí, během něhož by neměl testovaný objekt ukazovat částečné výboje překračující předepsanou velikost. Předepsanou velikostí částečného výboje se rozumí jeho nejvyšší hodnota prezentovaná libovolným diagnostickým parametrem (obvykle q).

### **Zapalovací napětí částečných výbojů $U_i$**

Zapalovací napětí částečných výbojů je nejnížší hodnota testovacího napětí, při které dojde k zachycení stabilních částečných výbojů za předpokladu, že je testovací napětí plynule zvyšované z určité počáteční nízké hodnoty do chvíle zaznamenání existence těchto výbojů. Udává se ve voltech, resp. kV.

V praxi je to nejnížší napětí, při kterém dojde ke vzniku částečných výbojů o intenzitě překračující určitou předepsanou hodnotu.

### **Zhášecí napětí částečných výbojů $U_e$**

Zhášecí napětí částečných výbojů je napětí, při kterém už nelze použitým detekčním obvodem zjistit stabilní výbojovou činnost za předpokladu, že je testovací napětí plynule snižované z hodnoty vyšší až do doby, kdy se částečné výboje stanou nezachytitelnými. Udává se ve voltech, resp. kV.

V praxi je to napětí, při kterém ustávají částečné výboje přesahující za předepsaných podmínek předepsanou mezní hodnotu [5].

## 9 Návrh měření parametrů izolovaného vodiče pro různé provozní a poruchové stavy

### *Závislost na teplotě*

Teplotní namáhání může mít charakter jak krátkodobého tak dlouhodobého působení. Zatím co krátkodobé působení má za následek obvykle vratné změny vlastností, dlouhodobé působení teploty způsobí skoro vždy změny nevratné.

1. Měření se bude provádět v prostředí do kterého se nebude nijak zvlášť zasahovat. Teplota bude cca. 22°C a vlhkost do 10%.
2. Okolí vodiče se zahřeje na teplotu 60°C při vlhkosti 10%. Sledováno bude napětí a TRMS hodnota napětí částečných výbojů.
3. Měření se bude provádět v prostředí zahřátém na +22°C při vlhkosti 30%.
4. Měření se bude provádět v prostředí zahřátém na +60°C při vlhkosti 60%.
5. Měření se bude provádět v prostředí ochlazeném na -20°C při vlhkosti 30%.

### *Závislost na druhu poruchy*

Každý faktor, který působí na izolovaný vodič se může aplikovat společně nebo odděleně. Je zapotřebí brát v úvahu, že žádný působící faktor nepůsobí samostatně. Považuji za lepší řešení je aplikovat společně. Izolované vedení může být vystaveno mnoha vlivům.

Závislost na druhu poruchy můžeme rozdělit do několika kategorií:

1. Působení písku

Vodič se položí do písku. Přípravek s pískem bude uzemněn. Toto měření bude simulovat pád vodiče na zem, kde materiál styku izolovaného vodiče se zemí bude písek.

2. Dotyk vodiče s konzolou

Izolovaný vodič se položí na uzemněnou elektrodu. Dotyk vodiče s uzemněnou elektrodou bude simulovat poruchu pádu vodiče na konzoli.

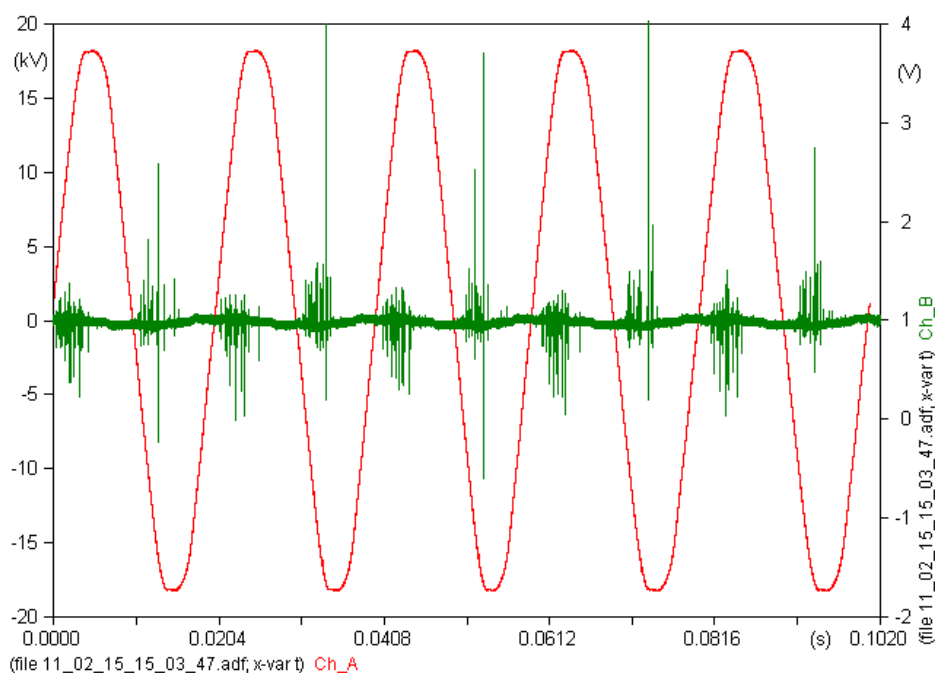
## 10 Experimentální měření stavu izolačního systému VN závěsných vodičů v různých klimatických podmínkách

Experimentální měření stavu izolačního systému probíhalo ve školní laboratoři L1. Samotný izolovaný vodič byl namáhán v klimatické komoře pomocí klimatických vlivů při fázovém napětí 13 kV. Podrobný popis klimatické komory je blíže popsán v kapitole 6.

Přírodní klimatické vlivy působí dlouhodobě. Proto i klimatická komora musela působit na izolační systém dlouhodobě. Různých klimatických podmínek se docílilo změnou teploty a vlhkosti. Při teplotě 22 °C byla klimatická komora vypnuta. Pro zkonstruování klimatických podmínek vyšších nebo nižších teplot bylo zapotřebí komoru zapnout a vyhřát nebo ochladit ještě před samotným měřením, aby byla teplota uvnitř klimatické komory stálá.

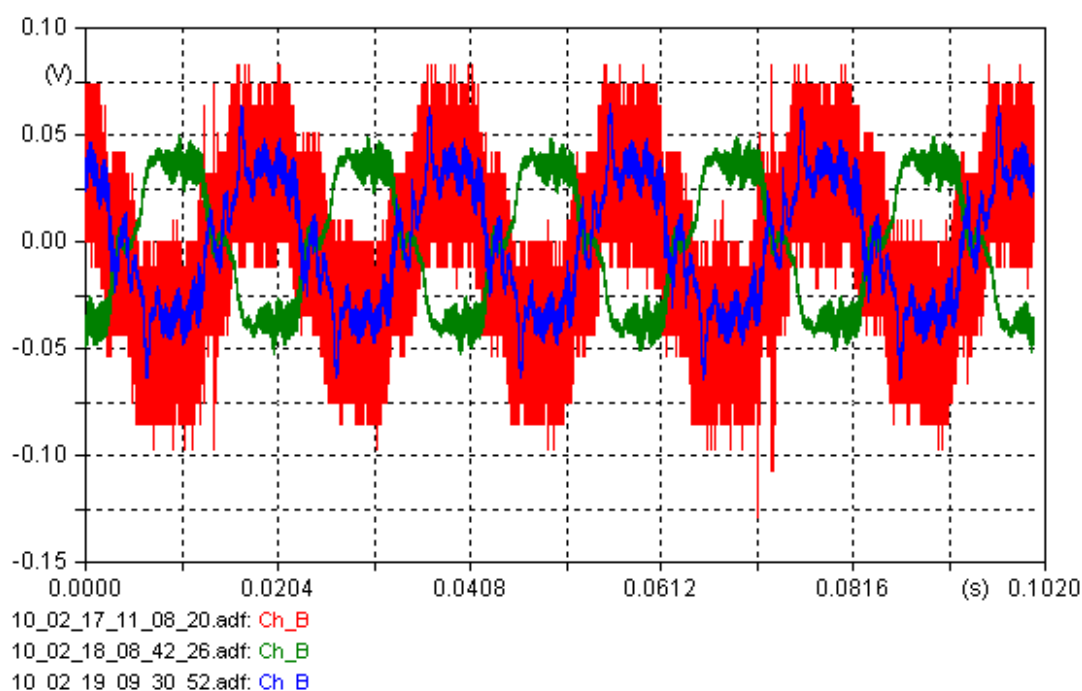
### 10.1 Experimentální měření v závislosti na vlhkosti

Pro experimentální měření, kdy izolační systém bude vystaven působení vlhkosti, se muselo vytvořit v klimatické komoře prostředí s velkou vlhkostí. Přidáním nádob s vodou se docílilo až 60 % vlhkosti. Experimentální měření probíhala při teplotě 22 °C, 60 °C a -20 °C. Experimentální měření v klimatické komoře byla dlouhodobá. Jedno měření probíhalo 4 dny. Měření se průběžně kontrolovalo návštěvou laboratoře. Signál z kapacitního děliče byl zaznamenáván pomocí počítače v programu labview. Na obr. 10-1 je zobrazeno kde a v jakém poměru vznikají částečné výboje.



Obr. 10-1 Vznik částečných výbojů při měření bez poruchy, teplota 22 °C, vlhkost 18 %

Při měření částečných výbojů bez poruchy vznikají pouze výboje o velikosti 0,2 V. Tato hodnota je velmi malá. To mohlo způsobit buď rušení v síti, nebo se také mohlo jednat o korónu.



Obr. 10-2 Napětí částečných výbojů měřené bez poruchy s působením vlhkosti

Červenou barvou je zobrazeno napětí částečných výbojů, kdy měření probíhalo bez poruchy při teplotě 22 °C a při vlhkosti 20 %. Zelenou barvou je vyneseno napětí částečných výbojů bez poruchy při teplotě +60 °C a při vlhkosti 60%. Modrou barvou je zobrazeno napětí částečných výbojů bez poruchy při teplotě -20 °C a při vlhkosti 30 %.

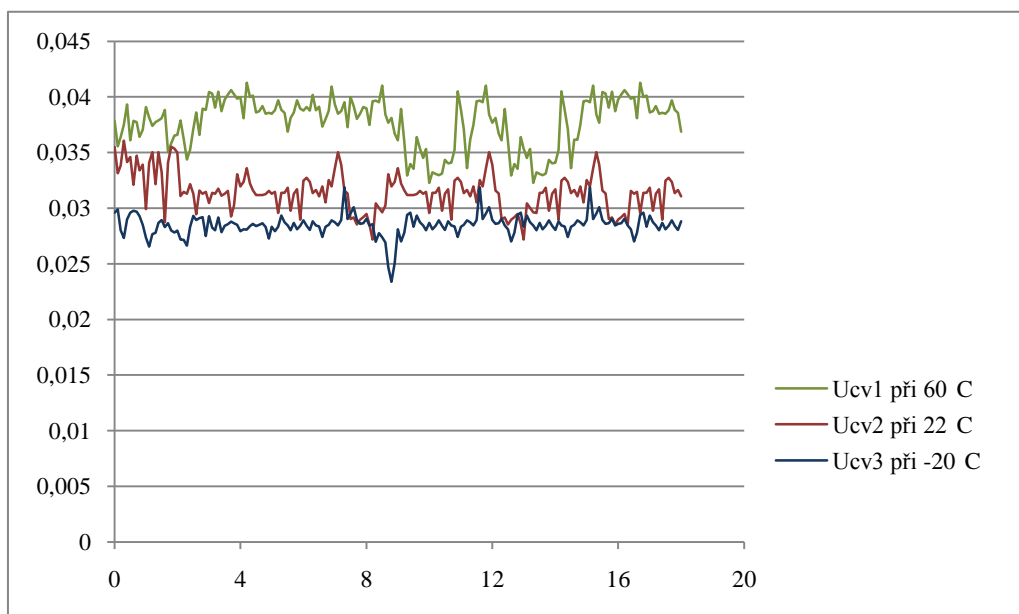
V počítačovém programu labview byl vytvořen program, který zpracuje výstupní signál z kapacitního děliče. Ze záporných čísel vytvoří absolutní hodnoty těchto čísel. Od hranice 0,004 V počítá četnost částečných výbojů na časovém intervalu jedné periody, což je 20 ms.

Tab. 10-1 Četnost částečných výbojů a hodnoty RMS pro bezporuchový stav při zvýšené vlhkosti

Teplota (°C)	Vlhkost (%)	Četnost částečných výbojů ( $\text{v.s}^{-1}$ )	TRMS (V)
22	20	287626	0,011179
60	60	1812	0,000783
-20	30	1061	0,000890

Četnost částečných výbojů při teplotě 22 °C a vlhkosti 20% dosahovala hodnoty  $287626 \text{ v.s}^{-1}$  a RMS napětí dosahovala hodnoty 0,011179 V. Při teplotě 60 °C a vlhkosti 60 % četnost částečných výbojů výrazně klesla na hodnotu  $1812 \text{ v.s}^{-1}$  a RMS napětí 0,000783 V. Při teplotě -20 °C a vlhkosti 30 % byla četnost částečných výbojů nejmenší v porovnání

s ostatním experimentálním měřením bez poruchy závislých na vlhkosti, dosahovala 1061 v. s<sup>-1</sup>. Hodnota RMS napětí byla 0,000890 V.



*Obr. 10-3 RMS hodnoty napětí měřené bez poruchy namáhané vlhkosti*

Největší RMS hodnoty napětí měřené bez poruchy v závislosti na vlhkosti byli naměřené při teplotě 60 °C a vlhkosti 60 %. RMS hodnota napětí dosahovala 0,042 V. Naopak nejnižší RMS hodnotou bylo napětí pod 0,025 V při teplotě -20°C a vlhkosti 30%.

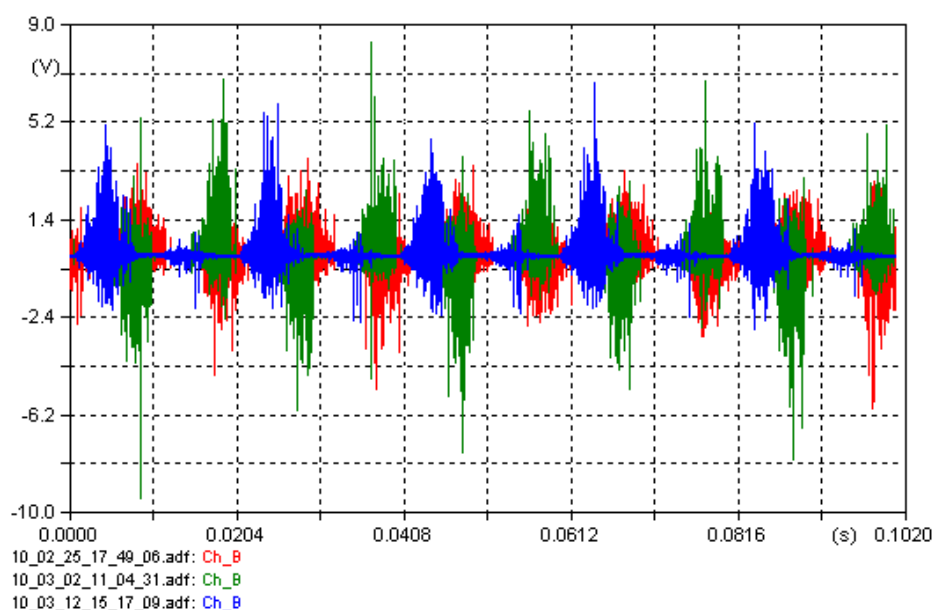


## 10.2 Experimentální měření simulující poruchu pádu vodiče na uzemněnou konzoli

Ve školní laboratoři L1 probíhala tři dlouhodobá měření simulující poruchu způsobenou pádem vodiče na uzemněnou konzoli ve vytvořených klimatických podmínkách. Schéma vytvoření poruchy způsobenou pádem vodiče na uzemněnou konzoli je doplněno o uzemněnou železnou plechovou část, která byla použita jako konzole. Vodič byl položen do uzemněného plechového žlábků. Měření byla dlouhodobá, každé probíhalo 4 dny.



Obr. 10-4 Přípravek pro simulaci poruchy pádu vodiče na uzemněnou konzoli



Obr. 10-5 Napětí částečných výbojů měřené při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli

**Červenou** barvou je zobrazeno napětí částečných výbojů při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli při teplotě 22 °C. **Zelenou** barvou je vyneseno napětí částečných výbojů při simulované poruše způsobené pádem vodiče na uzemněnou konzoli při teplotě 60 °C. **Modrou** barvou je vyneseno napětí částečných výbojů při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli při teplotě -20 °C.

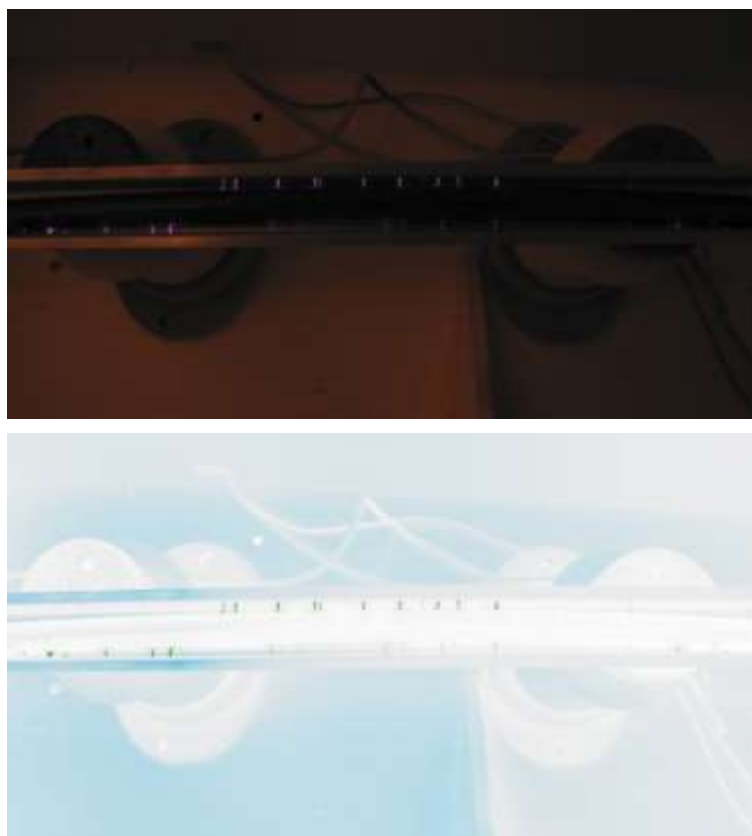
Z grafu je vidět, že největší napětí částečných výbojů pro simulovanou poruchu pádu vodiče na uzemněnou konzoli vznikalo při klimatických podmínkách, kdy izolační systém byl zahříván na teplotu 60 °C. Hodnota tohoto napětí dosahuje až 8 V. Izolační systém vodiče se zahřívá a měkne. U nepatrně měkké izolace tak může vzniknout větší napětí částečných

výbojů. V ochlazeném okolí na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  je napětí částečných výbojů u izolovaného vodiče kolem 5 V. Toto napětí je při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli nepatrně menší než u zahřívání izolačního systému vedení na teplotu  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při teplotě  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  můžou vzniknout napětí na částečných výbojích o velikosti 6 V. Nízká teplota má nežádoucí vliv na izolační systém vodiče. Izolační systém se může stát křehkým větší-li se napětí částečných výbojů.

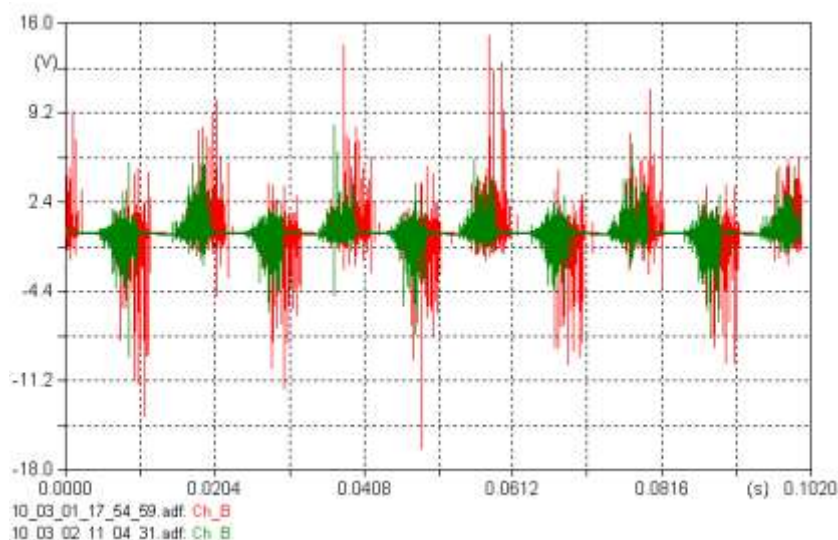
*Tab. 10-2 Četnost částečných výbojů a hodnoty RMS pro simulovanou poruchu pádu vodiče na uzemněnou konzoli*

Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	Vlhkost (%)	Četnost částečných výbojů ( $\text{v.s}^{-1}$ )	RMS (V)
22	50	299129	0,070745
60	49	293089	0,072768
-20	48	298623	0,051040

Z tabulky je vidět, že četnost částečných výbojů se pro simulovanou poruchu pádu vodiče na uzemněnou konzoli snížila při  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  na hodnotu  $293089\text{ v.s}^{-1}$ . Nejnížší hodnota RMS byla u teploty  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kdy hodnota RMS napětí dosahovala velikosti 0,051040 V.



*Obr. 10-6 Částečné výboje viditelné za šera a negativ fotografie*



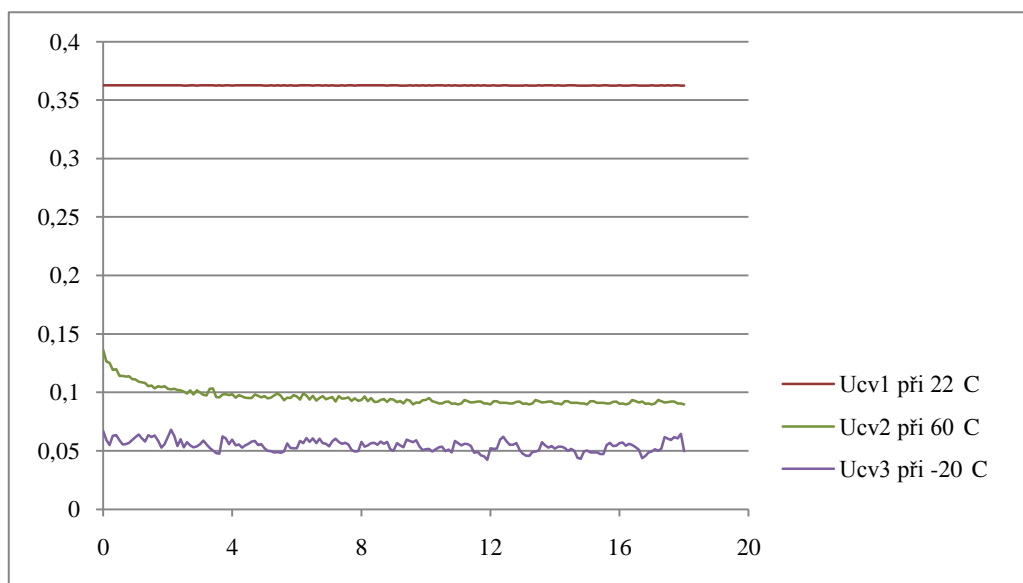
*Obr. 10-7 Napětí částečných výbojů při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli při teplotě +60 °C*

Největší napětí částečných výbojů bylo při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli při teplotě +60 °C. Jak můžeme vidět na obr. 10-6, kde počáteční napětí částečných výbojů, vykreslené **červeně**, bylo dokonce vyšší než napětí částečných výbojů zaznamenané na konci experimentálního měření, zobrazené **zeleně**.

*Tab. 10-3 Četnost částečných výbojů a hodnoty RMS pro simulovanou poruchu pádu vodiče na uzemněnou konzoli na začátku a na konci měření při teplotě +60 °C*

	Četnost částečných výbojů ( $\text{v.s}^{-1}$ )	TRMS (V)
začátek	292487	0,104989
konec	293089	0,072768

Z tabulky je vidět, že pro simulovanou poruchu pádu vodiče na uzemněnou konzoli při teplotě +60 °C se četnost částečných výbojů na konci experimentálního měření zvýšila až na hodnotu 293089 a RMS hodnota klesla až na 0,072768 V.



*Obr. 10-8 RMS hodnoty napětí měřené při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli*

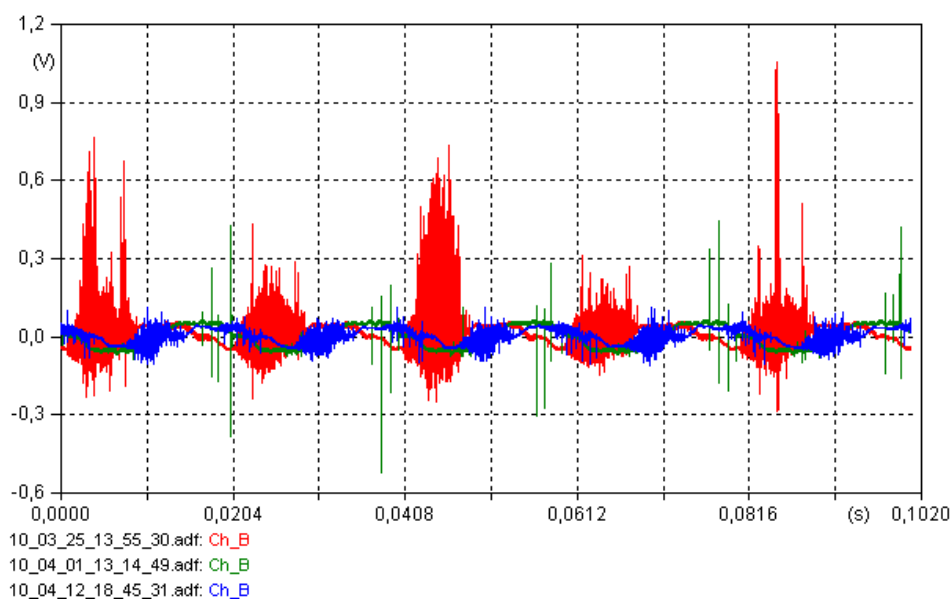
V grafu jsou zobrazeny RMS hodnoty zaznamenané při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli.  $U_{cv1}$  je označeno RMS napětí při teplotě 22 °C měřené při simulované poruše pádu vodiče na konzoli. Z grafu je vidět, že hodnoty měřené při 22°C jsou neměnné a tudíž chybné. Z grafu je možné jen odhadnout, že nejmenší hodnotu RMS napětí měřené při simulované poruše pádu vodiče na uzemněnou konzoli má napětí  $U_{cv3}$ .

### **10.3 Experimentální měření simulující poruchu pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí je písek**

Následující experimentální měření simulovalo poruchu pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí byl písek. Přípravek s pískem byl dokonale uzemněn. Izolovaný vodič byl klimatickými vlivy namáhán dlouhodobě po dobu čtyř dnů při teplotě 22 °C, 60°C a -20°C.



*Obr. 10-9 Přípravek s pískem a na něm položený izolovaný vodič typu PAS-W 70*



*Obr. 10-10 Napětí částečných výbojů při simulované poruše pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí je písek*

V grafu je **červenou** barvou vyneseno napětí částečných výbojů při teplotě 22 °C pro poruchu pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí je písek. **Zelenou** barvou je vyneseno napětí částečných výbojů při teplotě +60 °C pro poruchu pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí je písek. **Modrou** barvou je vykresleno napětí částečných výbojů při teplotě -20 °C pro poruchu pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí je písek.

Na grafu je vidět, že největší napětí částečných výbojů bylo při teplotě 22 °C. Izolovaný vodič byl vystaven klimatickým vlivům při teplotě +60 °C. Hodnota napětí částečných výbojů dosahoval druhé největší hodnoty. Při teplotě -20 °C dosahoval vzorek měření nejmenší hodnoty napětí částečných výbojů.

*Tab. 10-4 Četnost částečných výbojů a hodnoty RMS pro simulovanou poruchu pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí je písek*

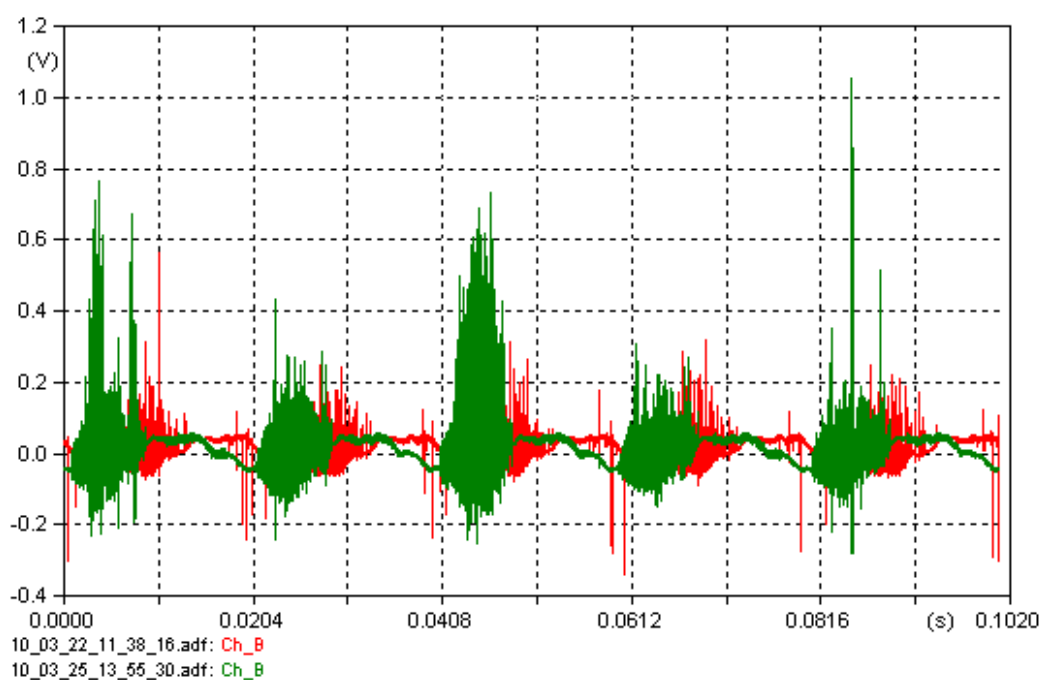
Teplota (°C)	Vlhkost (%)	Četnost částečných výbojů ( $\text{v.s}^{-1}$ )	RMS (V)
22	45	30281	0,007764
60	44	2249	0,002084
-20	43	6006	0,001787

Z tabulky je vidět, že četnost částečných výbojů se u simulované poruchy pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí byl písek se četnost částečných výbojů snížila při teplotě 60 °C na hodnotu 2249  $\text{v.s}^{-1}$ . Nejnížší hodnota RMS byla u teploty -20 °C, kdy hodnota RMS dosahovala 0,001787 V.



*Obr. 10-11 Na přípravku s pískem je vidět kde probíhaly částečné výboje*

Na přípravku s pískem bylo vidět vypálená místa, kde probíhaly částečné výboje při namáhání v klimatickém prostředí za teploty  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Písek se v tomto teplém klimatickém prostředí vysušil a ztvrdl.



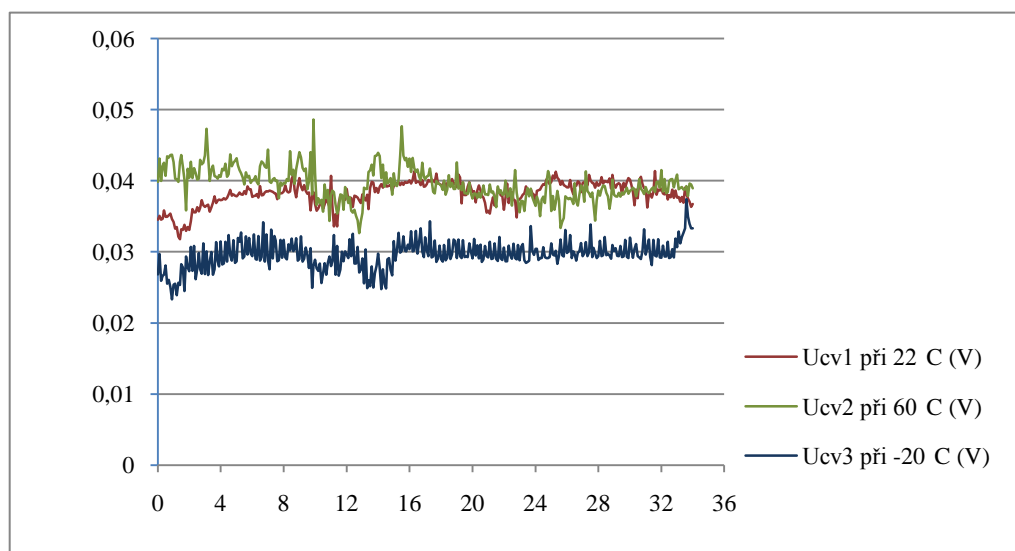
*Obr. 10-12 Částečné výboje při simulované poruše pádu vodiče na zem, materiál písek jen při teplotě  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$*

Na grafu je zřetelně vidět, jak se zvětšovalo napětí na částečných výbojích za dobu měření 4 dnů. Červená barva ukazuje počátek měření a zelenou barva vykresluje napětí částečných výbojů ke konci experimentálního měření. Graf ukazuje částečné výboje při teplotě  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  a simulaci poruchy pádu vodiče na zem, kde materiálem dotyku země s izolovaným vodičem je písek.

Tab. 10-5 Četnost částečných výbojů a hodnoty RMS pro simulovanou poruchu pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí byl písek při teplotě 22 °C

	Četnost částečných výbojů ( $\text{v.s}^{-1}$ )	TRMS (V)
začátek	4837	0,002875
konec	30281	0,007764

Z tabulky je vidět, že pro simulovanou poruchu pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí byl písek při teplotě 22 °C se četnost částečných výbojů na konci experimentálního měření zvýšila až na hodnotu 30281  $\text{v.s}^{-1}$  a RMS hodnota stoupla na 0,007768 V.



Obr. 10-13 RMS hodnoty napětí měřené při simulované poruše pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče byl písek

Největší RMS hodnoty napětí měřené při simulované poruše pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče byl písek byli naměřené při teplotě 60 °C. Při působení klimatických vlivů při teplotě 22 °C vznikaly RMS hodnoty napětí podobné velikosti jako u namáhání 20 °C. Při teplotě -20 °C byli naměřeny nejmenší hodnoty RMS napětí při simulované poruše pádu vodiče na zem, kde materiálem styku izolovaného vodiče se zemí byl písek.

## 11 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo diagnostikovat vysokonapětové izolované venkovní vedení v různých klimatických podmínkách.

V první části diplomové práce jsem se zaměřil na metody pro diagnostiku izolačních systémů a uvedl jejich schopnost výpovědi. Dále jsem uvedl geometrický popis izolovaných závěsných vodičů a vypsals jejich základní parametry z katalogových listů.

V další části jsem rozdělil elektrické výboje a popsal vznik vnitřních a vnějších částečných výbojů. Podrobně jsem popsal měřicí pracoviště s klimatickou komorou, kterou zkonstruoval doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D. pro měření v různých klimatických podmínkách.

Klimatickou komoru jsem zobrazil v konstrukčním počítačovém programu Solidworks. Klimatická komora může pracovat v rozsahu teplot od  $-30$  až  $60^{\circ}\text{C}$  s přiměřenou vlhkostí okolního vzduchu.

V diplomové práci jsem vypsals metody pro detekci částečných výbojů. Metody pro detekci částečných výbojů mohou být přímé elektrické (např. měřicí impedance snímání částečných výbojů), nepřímé elektrické (např. metoda induktivně vázané sondy) a neelektrické (např. akustické).

Uvedl jsem veličiny charakterizující částečné výboje jako např. zdánlivý náboj  $q$ , fázový úhel  $\varphi_i$ , četnost pulsů  $n$  aj.

V praktické části diplomové práce jsem uvedl návrh pro experimentální měření stavu izolačního systému vn závěsných vodičů v závislosti na teplotě, na napětí a na druhu poruchy.

Každé experimentální měření bylo dlouhodobé a probíhalo čtyři dny v laboratoři L1, kde samotný vodič byl vystaven klimatickým vlivům v klimatické komoře.

První vzorek izolovaného vodiče byl vystaven působení klimatických podmínek při teplotě  $22$ ,  $60$  a  $-20^{\circ}\text{C}$ . V klimatické komoře byla zvýšena vlhkost přidáním nádob s vodou, aby najednou působilo více klimatických vlivů. Schéma měření odpovídalo provoznímu bezporuchovému stavu.

Druhý vzorek izolovaného vodiče byl v klimatické komoře experimentálně vystaven působení klimatických vlivů za stejných teplot jako předchozí měření. Izolované vedení bylo položeno v plechovém uzemněném žlábků. Toto zapojení simulovalo poruchu dotyku vodiče s konzolí. Nádoby s vodou byly sice odebrány, ale i tak vlhkost v komoře dosahovala 50%.

Třetí vzorek izolovaného vodiče byl v klimatické komoře experimentálně vystaven působení klimatických podmínek při stejných teplotách jako předchozí měření. Vlhkost se pohybovala u hranice 45%. Izolované vedení bylo položeno na přípravku s pískem, který byl uzemněn. Toto zapojení simulovalo poruchu způsobenou pádem vodiče na zem.

Při měření se dbalo na bezpečnost, proto jsem vždy pracoval pod dohledem doc. Ing. Stanislava Mišáka, Ph. D. nebo Ing. Stefana Hamacka.



## LITERATURA:

- [1] Mentlík V.: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37214](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37214)
- [2] Internetové stránky Servis DS s.r.o. :  
[www.servisds.cz/download/Technicka\\_diagnostika.doc](http://www.servisds.cz/download/Technicka_diagnostika.doc)
- [3] Kreidl M.: *Diagnostické systémy*, ČVUT Praha 2001
- [4] Záliš K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*, ACADEMIA, Praha 2005
- [5] Mentlík, V.: *Diagnostika elektrických zařízení*, BEN Praha 2008
- [6] Kreidl M.: *Technická diagnostika*, BEN Praha 2006
- [7] Mentlík V.: *Dielektrické prvky a systémy*, BEN 2006
- [8] Mišák, S.: *Analýza poruchových dějů v průmyslových VN rozvodech a možnosti jejich omezení*, Habilitační práce VŠB-TUO 2009, Ostrava 2009
- [9] Obchodní portál ČEZ:  
<https://obchod.cezlogistika.cz/webshop/productslist.aspx?CategoryID=47&SubCategoryID=551>
- [10] Chmelík, K.: *Degradační procesy elektrických a elektrotechnických prvků a výrobků*
- [11] Bureš M., *Elektrická zařízení pracující ve ztížených klimatických podmínkách*  
Článek naleznete: <http://elektrika.cz>
- [12] Chmelík, K., Záliš, K., Mišák, S., Kozelský, J., *Technická diagnostika na elektrických zařízeních*
- [13] Gross, B., Havelka, O., *Elektrické přístroje II*, skriptu VUTBR, BRNO 1978
- [14] Internetové stránky firmy KPB Intra: <http://www.kpb intra.cz/cz/produkty/>